

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Determinació experimental de freqüències pròpies
acústiques en flux compressible**

MEMÒRIA

Autor: Bernat Ballester Vázquez
Director: David Valentín Ruiz
Convocatòria: Abril 2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

En aquest document s'hi troba la memòria del treball de final de grau amb títol “Determinació experimental de freqüències pròpies acústiques en flux compressible”. Es tracta d'un projecte per l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) amb col·laboració del departament de Mecànica de Fluids, que ha posat els mitjans necessaris per realitzar el procés d'experimentació.

Quan un fluid que circula a través d'una conducció és excitat a una freqüència que coincideix amb una de les freqüències pròpies o naturals de la conducció es produeix un fenomen anomenat ressonància acústica. Aquest és un fenomen conegut, que produeix augments de pressió dins la conducció i que pot resultar potencialment perillós, produint trencaments i fuites. No hi ha tant coneixement, però, sobre com es veuen afectades les freqüències acústiques amb elements que es troben típicament en conduccions, com per exemple vàlvules. Per tal d'estudiar aquest efecte s'ha realitzat un procés experimental amb un sistema format per una canonada cilíndrica i una vàlvula, i s'ha mesurat com evolucionen les pressions dins del sistema quan l'aire que hi circula és excitat a diferents freqüències mitjançant un ventilador.

En el cos del document s'hi tracta primerament els objectius generals que persegueix el projecte, així com les hipòtesis en les que es basa. A continuació es planteja el marc teòric del projecte, o s'explica el fenomen físic que s'estudia i la transformada de Fourier, que és la eina que permet realitzar l'anàlisi freqüencial amb el que s'obtingran els resultats que es busquen.

Un cop plantejat el marc teòric es passa a tractar el procés experimental seguit. En aquest apartat s'explica el sistema amb el que es treballa i les característiques dels elements que el formen, a més dels instruments amb els que es prenen les mesures i les eines que s'utilitzen per fer el tractament de les dades recollides. A continuació es passa a l'explicació del procés experimental, des del mètode seguit per a la presa de mostres fins al tractament de les dades per obtenir els resultats en el domini freqüencial, llestos per estudiar-los i treure'n conclusions. La secció experimental del projecte acaba amb l'exposició dels resultats obtinguts, amb la valoració que se'n fa i les conclusions que se'n treuen, comparant-los amb les hipòtesis plantejades inicialment per determinar si es compleixen o són incorrectes.

Per últim, s'inclou una proposta per utilitzar el sistema amb el que s'ha treballat i els resultats extrets per incloure'ls en una pràctica de laboratori sobre fluxos compressibles de l'assignatura de Sistemes de Distribució de Canonades que s'imparteix a l'escola. La proposta inclou els conceptes treballats al projecte que es poden incloure a la pràctica, així com els canvis necessaris en el sistema per adequar-lo als objectius d'aquesta.

Sumari

SUMARI	5
1. GLOSSARI	8
2. INTRODUCCIÓ	9
2.1. Objecte d'estudi.....	9
2.2. Objectius i abast del projecte	10
3. MARC TEÒRIC	12
3.1. Determinació analítica de les freqüències naturals del sistema.....	12
3.1.1. Expressions de les freqüències.....	13
3.1.2. Forma de les ones	15
3.2. La transformada de Fourier.....	22
4. EXPERIMENTACIÓ	25
4.1. Sistema estudiat.....	25
4.2. Freqüències naturals del sistema.....	27
4.3. Instrumentació.....	28
4.3.1. Font de tensió	28
4.3.2. Ventilador.....	29
4.3.3. Micròfon	30
4.3.4. Mòdul d'adquisició de dades.....	31
4.4. Programari.....	32
4.4.1. Pulse LabShop.....	32
4.4.2. BK Connect.....	33
4.5. Experiment realitzat.....	33
4.6. Preparació de l'experiment.....	36
4.7. Resultats.....	40
4.7.1. Configuració 0.....	40
4.7.2. Configuració 1.....	47
4.7.3. Configuració 2.....	50
4.7.4. Configuració 3.....	54
4.7.5. Variació de la freqüència natural fonamental	58
5. PROPOSTA PER INCLOURE ELS CONCEPTES TREBALLATS EN UNA PRÀCTICA DE LABORATORI	63
5.1. Objectius de la pràctica	63
5.2. Canvis necessaris al sistema	63

CONCLUSIONS	65
AGRAÏMENTS	66
BIBLIOGRAFIA	67
Referències bibliogràfiques	67
Bibliografia complementària	67
ANNEX	68
Fulls de característiques de la instrumentació	68

Fig. 3.1: Amplada de desplaçament de les partícules.....	16
Fig. 3.2: Variació de volum en dos instants diferents.....	17
Fig. 3.3: Amplada de l'ona de pressió.....	18
Fig. 3.4: Modes d'un conducte amb els dos extrems oberts.....	20
Fig. 3.5: Modes d'un conducte amb un extrem obert i l'altre tancat.....	21
Fig. 3.6: Mostres preses de la resposta temporal d'un sistema qualsevol.....	23
Fig. 4.1: Esquema del sistema utilitzat a l'experimentació.....	25
Fig. 4.2: Col·locació de la placa que fa la funció de vàlvula.....	26
Fig. 4.3: Cadena d'adquisició de dades.....	26
Fig. 4.4: Imatge de la font de tensió contínua utilitzada.....	28
Fig. 4.5: Característiques físiques del ventilador.....	29
Fig. 4.6: Imatge del ventilador instal·lat al sistema.....	30
Fig. 4.7: Imatge del micròfon instal·lat a la sortida del conducte.....	31
Fig. 4.8: Mòdul d'adquisició de dades utilitzat.....	31
Fig. 4.9: Interfície del Pulse LabShop.....	32
Fig. 4.10: FFT de les dades recollides a les diferents tensions aplicades al ventilador.....	37
Fig. 4.11: FFT de les dades mesurades amb un canal del ventilador tancat.....	39
Fig. 4.12: Comparació de les freqüències excitades.....	39
Fig. 4.13: FFT del sistema a la configuració 0.....	41
Fig. 4.14: Detall de la Fig. 4.13 en el rang entre 0 Hz i 50 Hz.....	42
Fig. 4.15: Corba formada pels pics obtinguts a les FFT del sistema a la configuració 0.....	42
Fig. 4.16: Pics de la FFT als diferents punts de mesura a la configuració 0.....	43
Fig. 4.17: Modes a les freqüències destacades a la configuració 0.....	45
Fig. 4.18: Modes restants a la configuració 0.....	46
Fig. 4.19: FFT del sistema a la configuració 1.....	47
Fig. 4.20: Pics de la FFT als diferents punts de mesura a la configuració 1.....	47

Fig. 4.21: Modes a les freqüències destacades a la configuració 1.	49
Fig. 4.22: Modes restants a la configuració 1.....	50
Fig. 4.23: FFT del sistema a la configuració 2.	50
Fig. 4.24: Pics de la FFT als diferents punts de mesura a la configuració 2.	51
Fig. 4.25: Modes a les freqüències destacades a la configuració 2.	53
Fig. 4.26: Modes restants a la configuració 2.....	54
Fig. 4.27: FFT del sistema a la configuració 3.	55
Fig. 4.28: Pics de la FFT als diferents punts de mesura a la configuració 3.	55
Fig. 4.29: Modes a les freqüències destacades a la configuració 3.	57
Fig. 4.30: Modes restants a la configuració 3.....	58
Fig. 4.31: Evolució de les freqüències amb la màxima pressió registrada.	59
Fig. 4.32: Evolució de la pressió màxima registrada.	59
 Taula 3.1: Situació als extrems d'un conducte.	19
Taula 4.1: Freqüències dels primers cinc modes del sistema calculades analíticament.	27
Taula 4.2: Configuracions de la vàlvula que s'estudiaran durant l'experimentació.	34
Taula 4.3: Posició dels punts de mesura.	34
Taula 4.4: Tensions d'alimentació aplicades al ventilador.	35
Taula 4.5: Freqüències excitades a les tensions subministrades.	38
Taula 4.6: Freqüències excitades amb un canal del ventilador tancat.	40
Taula 4.7: Característiques de les freqüències excitades a la configuració 0.	44
Taula 4.8: Característiques de les freqüències excitades a la configuració 1.	48
Taula 4.9: Característiques de les freqüències excitades a la configuració 2.	52
Taula 4.10: Característiques de les freqüències excitades a la configuració 3.	56

1. Glossari

A la memòria s'utilitzen termes i abreviatures per definir procediments seguits o referir-se a parts del sistema amb el que es treballa que apareixen diversos cops i que sense context poden dur a confusions. A continuació es defineixen aquests termes:

Termes referits a conceptes i procediments seguits:

- **Freqüència natural o freqüència pròpia:** són termes sinònims que s'utilitzen repetidament al llarg de la memòria per referir-se a les freqüències a les que un sistema tendeix a oscil·lar en rebre una pertorbació externa.
- **FFT:** són les sigles de Fast Fourier Transform, el mètode utilitzat en el tractament de les dades recollides amb el que s'obtenen els termes en domini freqüencial.

Termes sobre el sistema físic utilitzat:

- **Punts de mesura:** sempre que en aquesta memòria es parla de punts és per referir-se als forats fets al tub per tal d'introduir-hi el transductor per fer mesures. N'hi ha sis, enumerats des del punt 1, que és el més proper a l'inici del tub, fins al punt 6, que és a l'extrem de sortida del conducte.
- **Configuracions del sistema:** el terme configuració es refereix als diferents graus de tancament de la vàlvula amb els que s'ha experimentat. En total n'hi ha quatre, que s'han enumerat començant per la configuració 0, que té la vàlvula totalment oberta, fins a la configuració 3, cascuna amb un grau de tancament que va augmentant progressivament.

2. Introducció

2.1. Objecte d'estudi

Quan un sistema rep una pertorbació externa respon tendint a oscil·lar a una determinada freqüència. Aquesta freqüència, anomenada freqüència natural, és característica de cada sistema i depèn dels seus paràmetres físics. De fet, cada sistema té diverses freqüències naturals, que en funció de les característiques que tingui poden estar relacionades entre si o no. Quan hi ha una relació entre diferents freqüències naturals, és a dir, quan es produeixen en intervals regulars, s'anomena a cadascuna d'elles harmònic. En un sistema, però, també és possible trobar-hi freqüències que no tinguin aquesta relació de periodicitat amb les altres. Entre totes les freqüències naturals la que es produeix a una freqüència més baixa de totes s'anomena freqüència fonamental.

És possible que l'excitació rebuda pel sistema no sigui una pertorbació puntual que li permeti oscil·lar lliurement a les seves freqüències naturals, sinó que forci una freqüència determinada. En aquest cas el sistema es veu obligat a oscil·lar a la freqüència que se li imposa i hi respon. Quan la freqüència de les excitacions externes no coincideixen amb cap de les freqüències naturals del sistema les oscil·lacions que es produeixen no són motiu de preocupació, ja que són petites, però quan l'excitació es produeix a una de les freqüències naturals del sistema es produeix un augment dràstic de la magnitud afectada per les oscil·lacions, per exemple les vibracions en una estructura o la pressió acústica en un fluid compressible, anomenat ressonància.

El fenomen de la ressonància és d'especial importància en qualsevol sistema físic, ja que quan es produeix pot tenir conseqüències molt negatives. En general els dissenys es fan de manera que s'eviti que les excitacions externes tinguin la freqüència natural del sistema, com per exemple en el cas d'una via de tren que passa sobre un pont, que es dissenya de manera que tingui una freqüència natural fonamental que no coincideixi amb l'excitació produïda pel tren que hi passa. D'aquesta manera s'evita l'augment en les vibracions que es produirien en cas d'entrar en ressonància, que podrien afectar l'estructura i causar desperfectes greus. L'exemple mencionat és un cas de ressonància mecànica, en el que una pertorbació exterior produeix vibracions en un cos sòlid, però hi ha altres tipus de ressonància, com ara la ressonància acústica. Aquest tipus de ressonància és el produït per les ones de pressió generades en un fluid compressible que quan rep excitacions exteriors. Quan la freqüència de l'excitació coincideix amb la de ressonància del sistema per on circula el fluid hi ha una amplificació significativa de l'amplada de les ones de pressió.

Aquest projecte es centra en els efectes de la ressonància acústica en instal·lacions que

conduïxen gasos: quan un sistema d'aquestes característiques entra en ressonància es registren grans augments en la pressió a l'interior del conducte, que poden produir fugues o ruptures perilloses a causa de la fatiga causada en el material del conducte.

En sistemes simples, com ara conductes cilíndrics, les freqüències naturals es poden calcular fàcilment de forma analítica, però quan els sistemes es tornen més complexos i el fluid que hi circula interactua amb altres elements típics en conduccions, com per exemple vàlvules, la determinació de les freqüències naturals amb mètodes analítics es complica, de manera que s'ha de recórrer als mètodes empírics o a la simulació per ordinador. Tenint en compte els elevats costos i les complicacions logístiques que van associats a l'experimentació empírica, habitualment s'utilitza la simulació per fer aquests càlculs. Aquesta memòria, però, tracta sobre el procés experimental realitzat amb un sistema senzill format per una canonada cilíndrica amb una vàlvula en el que s'ha estudiat els efectes de la ressonància acústica i la relació de la freqüència natural amb el grau de tancament de la vàlvula.

L'experimentació es basa en la hipòtesi que el tancament d'una vàlvula fa que es produeixi una variació de les característiques del sistema que com a conseqüència provoca un canvi de la freqüència natural d'aquest. Si és així, la freqüència natural d'un sistema de canonades amb vàlvules instal·lades depèn de quin sigui el grau de tancament d'aquestes. Per comprovar la veracitat de la hipòtesi s'ha dissenyat un procés experimental en el que s'estudiarà un sistema senzill format per una canonada cilíndrica i una vàlvula. Per diferents graus de tancament de la vàlvula es determinarà la freqüència de ressonància del sistema mitjançant l'excitació de diferents freqüències a l'aire de l'interior de la canonada. Si la hipòtesi és correcta, la freqüència natural hauria de presentar variacions a mesura que es tanca la vàlvula.

2.2. Objectius i abast del projecte

Aquest projecte es proposa estudiar quin efecte té sobre les freqüències naturals d'un sistema format per un tub que conduïx un flux de fluid compressible (aire, en aquest cas) la introducció d'una vàlvula.

Per tal de comprovar la veracitat de la hipòtesi en què es basa el projecte es partirà d'un sistema format per un conducte cilíndric. A un dels extrems s'hi instal·larà un ventilador que tindrà la funció d'excitar diferents freqüències a l'aire de l'interior del conducte. Mesurant la pressió que es produeix com a conseqüència de l'excitació es mesurarà la freqüència natural fonamental del sistema a partir de l'anàlisi freqüencial de les dades obtingudes.

Aquest anàlisi es farà a partir de la transformada de Fourier de les dades, que les convertirà del domini temporal on es recullen al domini freqüencial, que permet veure quina és l'amplitud de la pressió a cada freqüència. Amb les dades en el domini freqüencial es determinarà la freqüència natural, que serà aquella freqüència on es produeixin les pressions més elevades.

Adicionalment, les dades preses en diferents punts del conducte permetran determinar com varia l'amplitud de les ones acústiques al llarg d'aquest i d'aquesta manera dibuixar el mode generat en el sistema. Quan s'arribi a una freqüència natural aquest mode ha de tenir una forma concreta, amb un cert nombre de nodes i antinodes que depèn de les característiques geomètriques del sistema i de l'harmònic que s'hagi excitat.

Un cop es tinguin les dades i s'hagi determinat quines són les freqüències naturals a cadascuna de les configuracions amb les que s'experimentarà es passarà a estudiar la variació de les freqüències naturals a mesura que es tanca la vàlvula. S'intentarà determinar si aquesta variació es produeix, i per tant si la hipòtesi inicial es compleix i, en cas afirmatiu i si la instrumentació disponible i les dades recollides ho permeten, determinar com és i com es pot relacionar amb el grau de tancament de la vàlvula.

Per últim, en funció dels resultats que s'obtinguin es presentarà una proposta per incloure una pràctica de laboratori que tracti la ressonància acústica en flux compressible a l'assignatura de Sistemes de Distribució de Canonades. Es proposaran aspectes que puguin formar part de la pràctica i es plantejarà com implementar-los. A més, es proposaran canvis en el sistema utilitzat en aquest projecte per tal que es pugui utilitzar per estudiar l'efecte sobre la pressió interior de la freqüència excitada en el fluid i determinar el mode generat.

3. Marc teòric

Abans de realitzar el procés experimental és necessari plantejar alguns aspectes que s'hi treballaran, com els fenòmens físics que es produeixen a l'interior del tub o les eines que s'utilitzaran pel tractament de les dades que es mesurin.

En els propers subapartats es tractaran aquests temes. Primer es tractarà la ressonància acústica, com es pot determinar analíticament a quines freqüències es produeix i les distribucions de pressió que genera a l'interior del sistema cada harmònic. A continuació es parla de la transformada de Fourier, l'eina que s'utilitza en el tractament de dades i que permet veure-les en el domini freqüencial, des d'on es pot fer un anàlisi de les freqüències excitades en el fluid i l'efecte que tenen sobre la pressió del sistema.

3.1. Determinació analítica de les freqüències naturals del sistema

Analíticament és difícil determinar les freqüències naturals d'un sistema qualsevol, donat que aquestes depenen de molts factors tant geomètrics com físics, de manera que habitualment es determinen experimentalment o amb simulacions amb el mètode dels elements finits. En el cas de la conducció que s'estudia en aquest projecte, que inclou una vàlvula i un ventilador a l'extrem, un anàlisi modal analític no és una opció gaire efectiva ja que modelar l'efecte que té la vàlvula o les condicions de contorn a l'entrada que imposa el ventilador comporta una dificultat de càlcul que es pot evitar si s'opta per mètodes empírics o numèrics, i que a més queda fora de l'abast d'aquets projecte.

En sistemes més simples, que tenen geometries constants, condicions de contorn clares, com per exemple entrades i sortides completament tancades o obertes, i un flux de fluid que no troba obstacles al llarg del recorregut les expressions analítiques que determinen les freqüències naturals són molt més senzilles. Si es simplifica el sistema real per adaptar-lo a aquests casos es pot acotar el rang on es trobaran els diferents modes del sistema objectiu. Les simplificacions fetes al sistema objectius són les següents:

1. Eliminació de la vàlvula. D'aquesta manera s'obté una conducció cilíndrica de secció constant.
2. Eliminació del ventilador. Es faran els càlculs suposant dues condicions de contorn diferents a l'extrem d'entrada del sistema: primer considerant l'extrem completament obert a l'atmosfera i després considerant-lo completament tancat. L'extrem de sortida es considera obert en tots dos casos

A més, es consideren les següents hipòtesis respecte el fluid i el sistema:

1. El fluid és homogeni, amb densitat constant en tots els punts.
2. Les parets del sistema són rígides, i per tant no experimenten deformacions.
3. La longitud de la conducció és molt més gran que el radi ($L \gg R$). Per tant, es considera que la propagació d'ones és unidimensional, i sempre es produeix en la direcció x .
4. La pressió mitjana a l'interior del sistema és constant, concretament la pressió atmosfèrica, ja que el sistema està obert a l'atmosfera.

Les fórmules que s'utilitzen a continuació s'han extret del llibre "Formulas for natural frequency and mode shape" [1]. S'ha fet els càlculs suposant dues situacions diferents en quant a les condicions de contorn a l'entrada del sistema: d'una banda s'imposa que l'entrada està oberta a l'atmosfera i de l'altra, que està tancada. El sistema real té un ventilador instal·lat a l'entrada del conducte i la sortida oberta a l'atmosfera. L'efecte que tindrà el ventilador a l'entrada és desconegut: d'una banda és possible que degut a que l'aire segueix fluint pels dos extrems del conducte la freqüència natural del sistema real sigui la que s'obtingui amb l'equació per un tub amb els dos extrems oberts. De l'altra, pot ser que el ventilador apliqui un cert grau d'obstrucció a l'entrada del tub que faci que la freqüència natural del sistema sigui més propera a la que s'obté amb l'equació d'un conducte amb un extrem tancat. En qualsevol cas la freqüència natural del sistema real s'ha de trobar enmig de l'interval que marquen les freqüències obtingudes en els dos casos que es calcularan, de manera que els resultats que s'obtinguin proporcionaran uns valors de referència que es podran utilitzar per determinar si el rang de freqüències excitat pel ventilador és adequat per poder fer entrar el sistema en ressonància.

3.1.1. Expressions de les freqüències

Les freqüències naturals d'una conducció cilíndrica amb els dos extrems oberts queda determinada per la següent expressió:

$$f_{\text{entrada oberta}} = \frac{c}{2\pi} \left(\frac{\lambda_{j,k}}{R^2} + \frac{i^2 \pi^2}{2L^2} \right)^{1/2} \quad (3.1)$$

On:

c : velocitat del so a través del fluid. En el cas que s'estudia, aire.

L: longitud del cilindre.

R: radi del cilindre

i: mode de la freqüència en la direcció de propagació z.

$\lambda_{j,k}$: factor relatiu als modes de les freqüències en les direccions de propagació r i θ .

La tercera hipòtesi formulada imposa que la propagació de les ones és sempre en direcció axial, segons l'eix de coordenades z. Per tant el terme que inclou les propagacions en els altres eixos és menyspreable. Després de fer la simplificació l'equació queda de la següent manera:

$$f_{\text{entrada oberta}} = \frac{c}{2\pi} \left(\frac{i^2 \pi^2}{L^2} \right)^{1/2} = \frac{c i}{2L} \quad (3.2)$$

En el cas d'un cilindre amb un extrem obert i l'altre tancat, l'expressió que determina les freqüències naturals és la següent:

$$f_{\text{entrada tancada}} = \frac{c}{2\pi} \left(\frac{\lambda_{j,k}}{R^2} + \frac{i^2 \pi^2}{4L^2} \right)^{1/2} \quad (3.3)$$

On:

c: velocitat del so a través del fluid. En el cas que s'estudia, aire.

L: longitud del cilindre.

R: radi del cilindre

i : mode de la freqüència en la direcció de propagació z.

$\lambda_{j,k}$: factor relatiu als modes de les freqüències en les direccions de propagació r i θ .

Les dues expressions trobades a (3.1) i a (3.3) són molt similars. Això es deu a que la geometria del sistema és la mateixa, l'una diferència entre els dos casos és la determinació de les condicions de contorn a l'entrada, que només afecta al terme corresponent a la propagació d'ones en direcció axial. Igual que s'ha fet en el primer cas, si s'aplica la tercera

hipòtesi plantejada a l'equació (3.3) es pot menysprear el terme corresponent a les propagacions en direcció r i θ , i l'equació queda de la següent manera:

$$f_{\text{entrada tancada}} = \frac{c}{2\pi} \left(\frac{i^2 \pi^2}{4L^2} \right)^{1/2} = \frac{c i}{4L} \quad (3.4)$$

Amb les expressions trobades serà possible acotar els intervals en els que es trobaran els diferents modes del sistema real. Abans, però, falta determinar quina és la velocitat del so a través de l'aire. Donat que és un gas, es calcula a partir de la següent expressió:

$$c_{\text{aire}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{W}} \quad (3.5)$$

On:

γ : ràtio de calors específiques de l'aire a pressió constant i a volum constant $\frac{c_p}{c_v} = 1,40$

R : constant universal dels gasos (8,31 J/(K · mol)).

T : temperatura del sistema. Es considera que el sistema es troba a temperatura ambient, 20°C (273,15K).

W : pes molecular de l'aire (28,97 mol⁻¹). Donat que segons la primera hipòtesi es considera l'aire un fluid homogeni i amb densitat constant el pes molecular es considera constant en tots els punts del sistema.

Introduint aquests valors a l'equació s'obté un valor de $c = 343,21$ m/s constant per tot el sistema.

3.1.2. Forma de les ones

Cada harmònic té associada una determinada forma d'ona que depèn de la longitud d'ona i de les condicions de contorn del sistema. Representen el desplaçament de l'ona acústica i la

variació de les pressions a través del fluid en la direcció en què l'ona es propaga [2]. En el cas estudiat, quan el fluid s'excita mitjançant una pertorbació exterior, les partícules d'aire es desplacen en la direcció z del tub, d'acord amb la tercera hipòtesi plantejada, i només en aquesta direcció. El desplaçament local no és homogeni en tots els punts, sinó que en unes zones del conducte és més gran i en altres més petit. Aquestes diferències en els desplaçaments fan que hi hagi zones on hi ha una densitat més alta de partícules que en altres, i per tant també una pressió major. Així, es propaguen a través del tub zones amb altes pressions, anomenades zones de compressió, i zones de baixes pressions, que s'anomenen zones de rarefacció.

A la Fig. 3.1 es veu un exemple de la representació d'una ona de so. La corba representa l'amplada màxima del desplaçament de les partícules que es troben en una determinada posició z . Els punts on les partícules tenen sempre un desplaçament nul, per exemple el punt A de la figura, s'anomenen nodes, mentre que els punts on les partícules tenen una amplada de desplaçament màxima, com el punt B de la figura, s'anomenen antinodes.

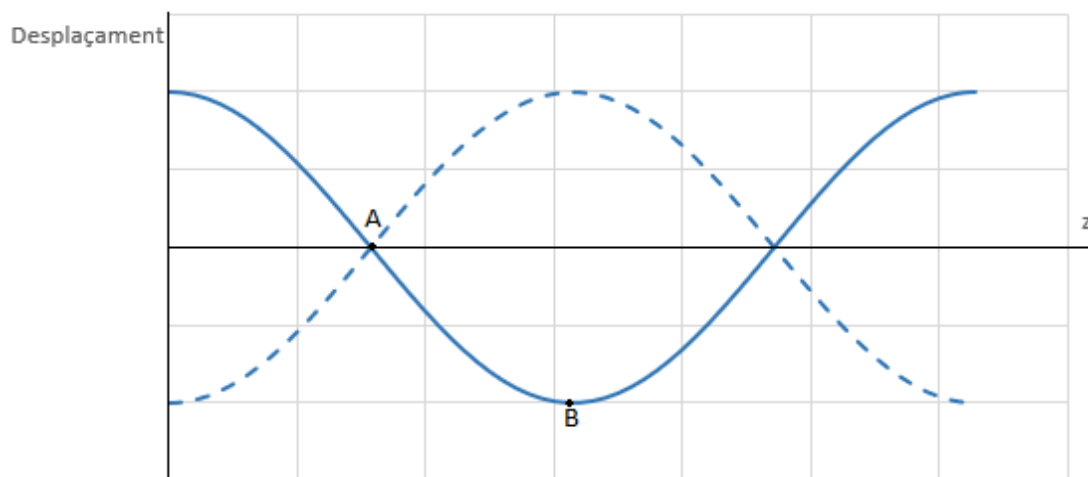


Fig. 3.1: Amplada de desplaçament de les partícules.

En un fluid invisible com l'aire és impossible determinar experimentalment el desplaçament de les partícules, i per tant s'ha de trobar una altra manera de definir les ones acústiques que permeti definir-les mitjançant els instruments disponibles al laboratori. Aquesta manera és a partir de les pressions que el desplaçament de les partícules generen al llarg de l'ona, que es poden mesurar fàcilment amb una sonda.

Partint d'una ona com la de la Fig. 3.1, que es defineix amb l'equació de desplaçament següent:

$$y(z, t) = A \cos (kz - \omega t + \varphi) \quad (3.6)$$

On

$y(z, t)$: desplaçament longitudinal de les partícules en una posició z i un instant de temps t determinat.

A : desplaçament màxim de les partícules.

k : nombre d'ona. És una constant que es defineix com $2\pi/\lambda$.

ω : pulsació d'ona. És una constant que es defineix com a $2\pi f$.

φ : desfasament d'ona.

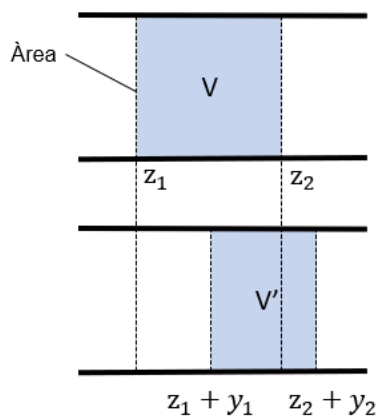


Fig. 3.2: Variació de volum en dos instants diferents.

Suposant que l'ona es propaga per un conducte com el de la Fig. 3.3, els punts z_1 i z_2 delimiten un volum aleatori V amb secció A constant i ortogonal a l'eix z , que es defineix com:

$$V = A(z_2 - z_1) \quad (3.7)$$

Quan l'ona es propaga es produeix un desplaçament de les partícules sempre en direcció z , cosa que implica que la secció A ortogonal a l'eix z no variarà amb el temps, però sí que ho faran els punts z_1 i z_2 , que es desplaçaran fins a $(z_1 + y_1)$ i $(z_2 + y_2)$, respectivament. Així es forma un nou volum V' , tal que:

$$V' = A((z_2 + y_2) - (z_1 + y_1)) \quad (3.8)$$

A partir de (3.7) i (3.8) es determina l'increment de volum que s'ha produït:

$$\Delta V = V' - V = A(y_2 - y_1) \quad (3.9)$$

L'increment de pressió es relaciona amb la variació de volum amb la següent expressió:

$$\Delta P = -B \frac{\Delta V}{V} = -B \frac{A(y_2 - y_1)}{A(z_2 - z_1)} = -B \frac{\Delta y}{\Delta z} \quad (3.10)$$

On B és mòdul de compressibilitat del fluid.

Si es considera una distància infinitesimal entre z_1 i z_2 l'equació (3.10) es pot reescriure com:

$$P = -B \frac{\partial y}{\partial z} \quad (3.11)$$

Per tant, si s'introdueix a (3.11) l'equació (3.6) s'obté una altra funció per definir l'ona segons la pressió que té en un punt i un instant determinats:

$$P(z, t) = ABk \sin(kz - \omega t + \varphi) = P_0 \sin(kz - \omega t + \varphi) \quad (3.12)$$

La distribució de pressions al llarg de z es pot veure a la Fig. 3.3.

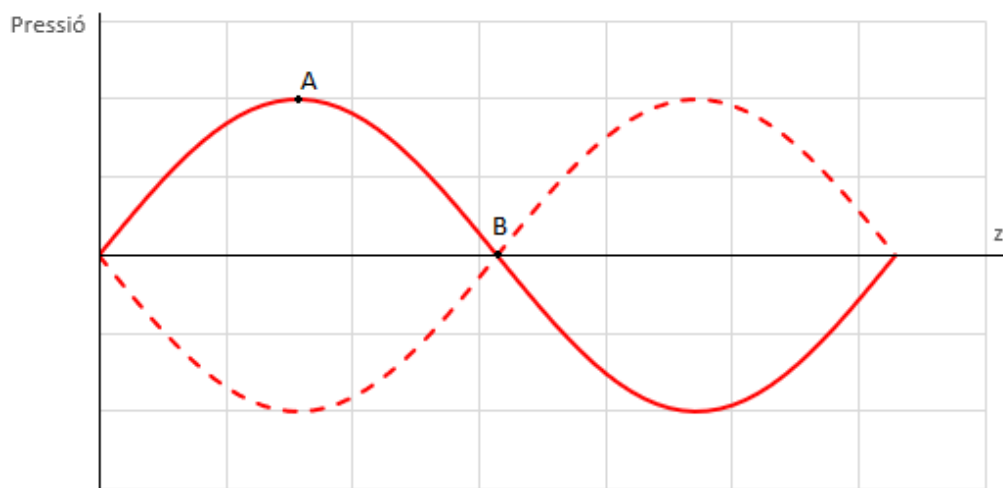


Fig. 3.3: Amplada de l'ona de pressió.

Comparant la Fig. 3.1 i Fig. 3.3 es poden extreure les següents conclusions:

- Una mateixa ona es pot expressar en termes de desplaçament longitudinal de les partícules o en termes de les pressions generades per aquests desplaçaments.
- Les dues ones tenen la mateixa freqüència i longitud d'ona, però l'ona de pressió està desfasada 90° respecte l'ona de desplaçaments. Això fa que els punts que a l'ona de desplaçament són nodes a l'ona de pressions siguin antinodes (punt A) i a l'inrevés (punt B).
- L'amplada de l'ona de pressió depèn del fluid, del desplaçament de les partícules i de la longitud d'ona.

Els diferents modes d'un sistema qualsevol es poden determinar imposant les condicions de contorn pròpies del sistema. En els casos estudiats aquestes condicions de contorn són principalment dues: quan un extrem està obert a l'atmosfera i quan un extrem està tancat. Vegem quines restriccions imposen aquestes condicions de contorn:

- Extrem obert: quan un extrem està obert la pressió en el punt on es troba aquest extrem ha de ser la mateixa que a l'entorn. Si aquest entorn és l'atmosfera, la pressió a l'extrem és la pressió atmosfèrica, és a dir una pressió relativa zero. Per tant, en aquest cas es té un node a la distribució de pressions i un antinode a la de desplaçaments.
- Extrem tancat: quan un extrem està tancat la restricció física imposa que les partícules que estan a l'extrem no poden desplaçar-se en la direcció de la restricció. Això implica que el desplaçament longitudinal en aquest punt és zero, i per tant hi ha un node a la distribució de desplaçaments. Per correspondència, hi ha un antinode a la distribució de pressions.

En resum:

	Extrem obert	Extrem tancat
Distribució de desplaçaments	Antinode	Node
Distribució de pressions	Node	Antinode

Taula 3.1: Situació als extrems d'un conducte.

A l'interior d'un sistema hi ha infinites distribucions possibles, anomenades harmònics o modes, cadascuna amb una longitud d'ona determinada i un cert nombre de nodes i

antinodes. Tot i això tots els modes d'un sistema comparteixen una mateixa configuració als extrems.

A continuació es mostra com són els primers modes de les dues aproximacions del sistema real. Com que les expressions d'un mode en termes de desplaçaments i de pressions són equivalents només hi ha representades les distribucions de pressions, que són les que es poden mesurar experimentalment.

En el cas d'un tub amb els dos extrems oberts a l'atmosfera les pressions a l'entrada i a la sortida són nul·les (en termes relatius, per tant la pressió és l'atmosfèrica), és a dir que hi ha nodes en tots dos extrems. El mode fonamental és el que té el mínim nombre de modes i antinodes possibles, i per tant és el que té la longitud d'ona màxima, que amb aquestes condicions als extrems seria el doble de la longitud del conducte. Els posteriors modes van guanyant nodes i antinodes progressivament.

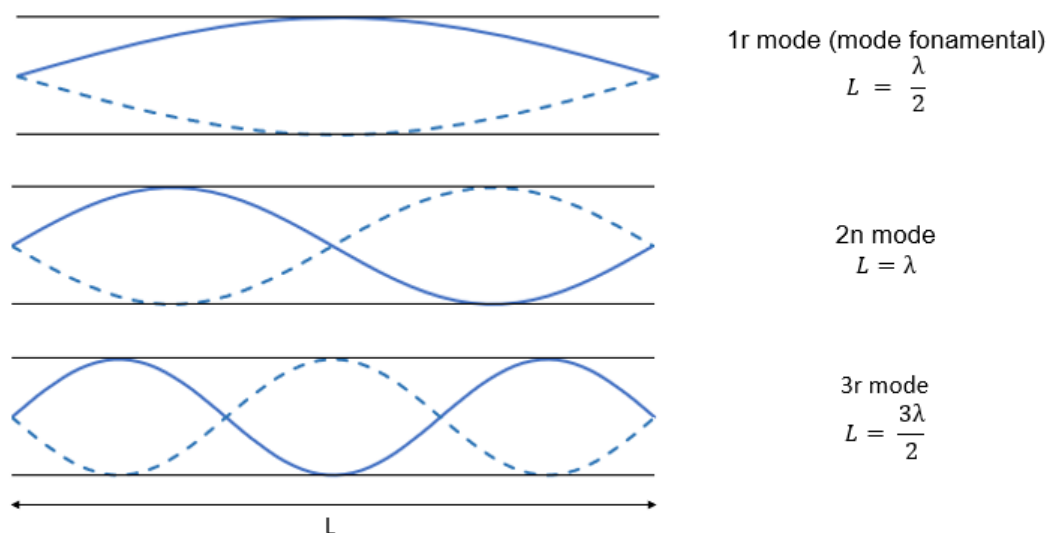


Fig. 3.4: Modes d'un conducte amb els dos extrems oberts.

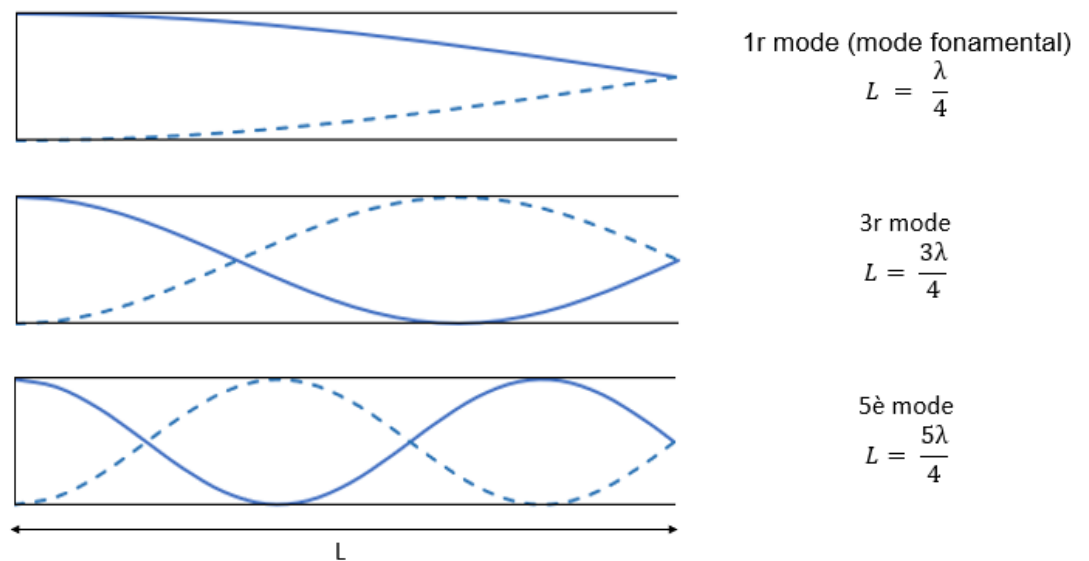


Fig. 3.5: Modes d'un conducte amb un extrem obert i l'altre tancat.

El nombre del mode depèn del nombre d'ones que es formen a l'interior del tub o, el que és el mateix, la fracció de la longitud d'ona que hi ha dins de la longitud L del tub. En el cas obert-obert la longitud del tub es pot expressar de la forma $L = \frac{i\lambda}{2}$, on el mode i pot ser qualsevol nombre natural positiu ($i = 1, 2, 3, \dots$). En canvi, en el cas tancat-obert la longitud del tub s'expressa en funció de la longitud d'ona com $L = \frac{i\lambda}{4}$, però el mode i només pot prendre valors naturals positius senars ($i = 1, 3, 5, \dots$). Això es deu a que en el segon cas els modes tenen un antinode a un extrem i un node a l'altre.

En el cas del sistema real la forma dels modes s'hauria de trobar enmig de les ones definides pels casos obert-obert i tancat-obert. La pressió a la sortida ha de ser la pressió atmosfèrica, de manera que hi haurà un node a la distribució de pressions. En canvi, la pressió a l'entrada és més difícil de preveure degut a la presència del ventilador. El ventilador en funcionament genera un augment de la càrrega en el sistema, de manera que es provoca un augment de la pressió entre la banda per on entra l'aire, que està a pressió atmosfèrica, i la banda per on surt, que té una pressió superior. Aquesta pressió depèn de la velocitat de rotació de l'eix del ventilador, però sempre serà superior que l'atmosfèrica. Això significa que a la distribució de pressions l'entrada del sistema no tindrà un node, com passa en el cas obert-obert, però tampoc un antinode, com en el cas tancat-obert, sinó que a l'extrem d'entrada hi haurà una certa pressió que anirà augmentant fins a arribar al primer antinode. En el cas del mode fonamental, que ha de tenir un sol antinode, aquest no es produiria al punt mig (cas obert-obert) ni a l'inici (cas tancat-obert), sinó que es veuria desplaçat. Val a dir que el comportament

descriu depèn en gran part de les característiques del ventilador, i que el que s'utilitza en l'experimentació té una capacitat d'aportar càrrega al sistema molt reduïda, de manera que és possible que l'efecte que causi sigui imperceptible. Això es veurà durant l'experimentació.

Tal com mostren les Fig. 3.4 i Fig. 3.5, a mida que augmenta el mode la longitud d'ona disminueix i apareixen nodes i antinodes a l'interior del tub. Un dels objectius definits és el de dibuixar la forma d'ona corresponent a una de les freqüències fonamentals del sistema real, i amb els instruments disponibles això s'ha de fer prenent un nombre finit de mostres al llarg del tub, de manera que com més simple sigui la forma de l'ona generada més es simplificarà la presa de mostres. És per això que és preferible excitar un mode el més baix possible, preferiblement el fonamental.

3.2. La transformada de Fourier

La transformada discreta de Fourier, també coneguda com DFT (de Discrete Fourier Transform), és una forma d'anàlisi de Fourier que permet convertir una funció des del seu domini original, com per exemple l'espacial o el temporal), cap al domini freqüencial a partir d'un nombre finit de mostres. És l'equivalent en temps discret de la transformada contínua de Fourier. S'utilitza per descompondre una funció origen en una suma de termes sinusoidals (sinus i cosinus), cadascun amb una freqüència i amplitud diferents.

El fet de que la transformada es trobi a partir de mostres de la funció origen és molt útil, ja que permet fer estudis freqüencials de sistemes reals, que no es poden definir en temps continu degut a les limitacions físiques que imposen els sensors, ja que aquests només són capaços d'obtenir lectures en instants determinats de manera que el temps s'ha de tractar com una variable discreta. La transformada es fa de la següent manera:

Suposem un sistema amb un comportament que proporciona un senyal $x(t)$ continu en el temps. La funció $x(t)$ és continua, però el sensor que s'utilitza per mesurar la magnitud que interressi (ja sigui una tensió, una pressió, etc.) del sistema només pot agafar mostres en instants concrets. Suposem que el sensor mesura N mostres $\{x_0, x_1, \dots, x_{N-2}, x_{N-1}\}$ separades entre si per intervals de temps regulars (veure Fig. 3.6).

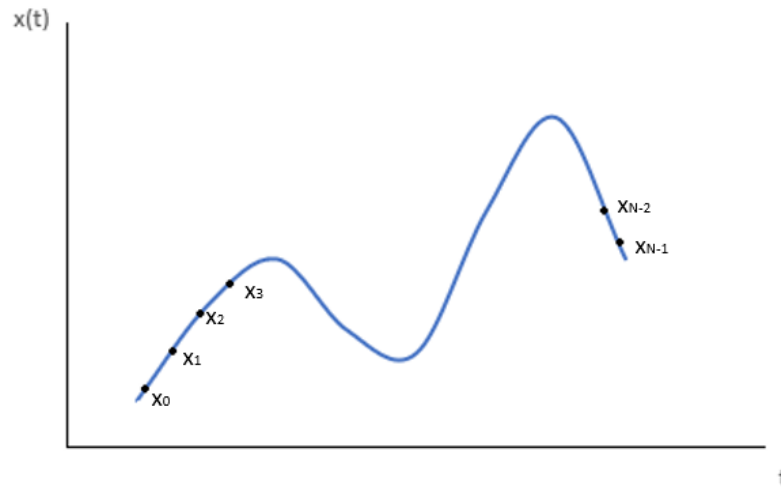


Fig. 3.6: Mostres preses de la resposta temporal d'un sistema qualsevol.

L'objectiu és transformar la seqüència de mostres preses en el domini temporal $\{x_n\} = \{x_0, x_1, \dots, x_{N-2}, x_{N-1}\}$ en els coeficients del domini freqüencial $\{X_k\} = \{X_0, X_1, \dots, X_{N-2}, X_{N-1}\}$, anomenats coeficients de Fourier. El vector de coeficients és de la mateixa longitud que el vector de mostres, i està definit per:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) - i \sin\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) \right] \quad (3.13)$$

O el que és el mateix:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i\frac{2\pi}{N}kn} \quad (3.14)$$

L'expressió (3.14) es pot escriure de forma matricial:

$$[X_k] = [A][x_n] \quad (3.15)$$

On $[A]$ és la matriu de transformació. Si s'expandeix l'equació (3.15) s'obté el següent sistema:

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W & W^2 & W^3 & \dots & W^{N-1} \\ 1 & W^2 & W^4 & W^6 & \dots & W^{N-2} \\ 1 & W^3 & W^6 & W^9 & \dots & W^{N-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & W^{N-1} & W^{N-2} & W^{N-3} & \dots & W \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

On $W = e^{-i \frac{2\pi}{N}}$.

L'expressió (3.16) és un sistema d'un nombre finit d'equacions, cosa que implica que es pot resoldre computacionalment. Hi ha un inconvenient, però, i és que aquest mètode és lent, i quan el nombre d'equacions a resoldre augmenta el mètode es torna poc eficient, ja que exigeix una capacitat de càlcul que la majoria dels ordinadors no tenen.

La solució a aquest problema és el que s'anomena la transformada ràpida de Fourier, FFT (de Fast Fourier Transform). Es tracta d'un algoritme que fa la mateixa funció que la DFT, representar una determinada funció en el domini freqüencial a partir d'un conjunt de mostres, però ho fa més ràpidament, reduint dràsticament el temps de computació. Hi ha molts algoritmes que permeten calcular una FFT, però el més conegut i utilitzat és l'algoritme de Cooley-Tukey. Es basa en subdividir la DFT original en altres de més petites en diferents etapes fins a obtenir DFTs senzilles que es poden resoldre ràpidament i, a continuació, recombinar els resultats per obtenir la solució de la DFT original.

El mètode de la FFT és una eina molt potent, utilitzada en una gran varietat d'aplicacions en el món de l'enginyeria, i és el mètode que s'utilitza en aquest projecte per al tractament de les dades recopilades pel posterior anàlisi en el domini freqüencial.

4. Experimentació

4.1. Sistema estudiat

El sistema estudiat és un conducte cilíndric de 5,4 metres de longitud per on circula aire. Un dels extrems està obert a l'atmosfera i a l'altre hi ha incorporat el ventilador utilitzat per excitar diferents freqüències en el fluid. La freqüència excitada en el fluid està relacionada amb la velocitat de rotació del ventilador, que es controla amb una font de tensió. Per tal de fer les mesures s'utilitza un micròfon *Brüel & Kjaer type 4957*, que permetrà mesurar la pressió en determinats punts al llarg del conducte on s'han realitzat forats.

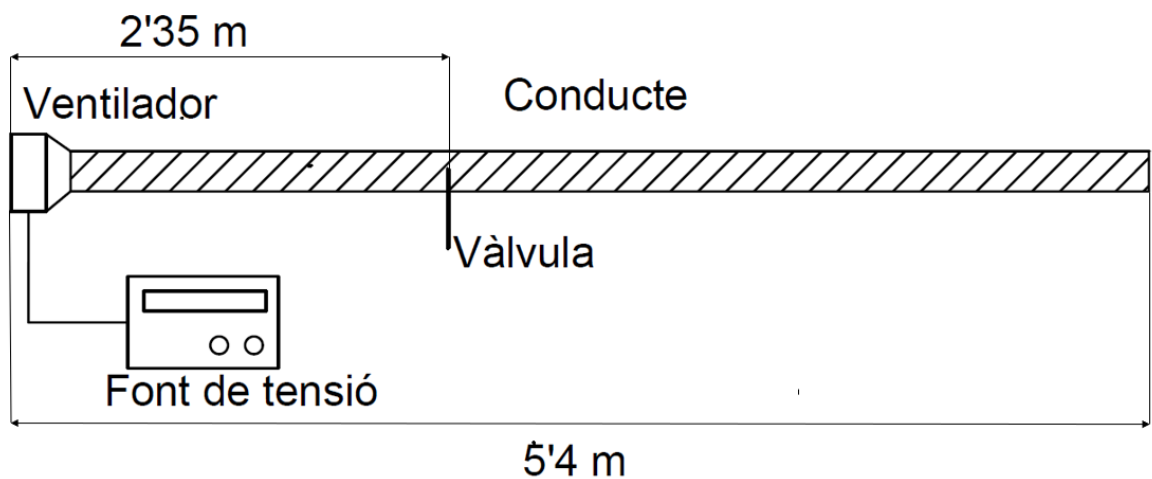


Fig. 4.1: Esquema del sistema utilitzat a l'experimentació.

A una distància $z = 2'35$ m de l'inici del conducte hi ha una de les unions entre les diferents parts que formen el conducte. En aquest punt s'ha instal·lat una planxa metàl·lica que es pot situar en diferents posicions, obstruint el conducte més o menys, de la mateixa manera que passa amb una vàlvula instal·lada en un sistema de distribució o transport de fluids. Per tal de veure les diferències que es produeixen a banda i banda de la vàlvula hi ha dos punts de mesura pròxims a la posició on està situada, el punt 2 i el 3. Com que estan situats tan a prop l'un de l'altre el punt 2 només s'utilitzarà quan es tanqui la vàlvula. Per la configuració amb la vàlvula completament oberta no s'agafarà la mostra en aquest punt ja que no s'espera que hi hagi cap diferència significativa entre les lectures que s'hi facin i les del punt 3.

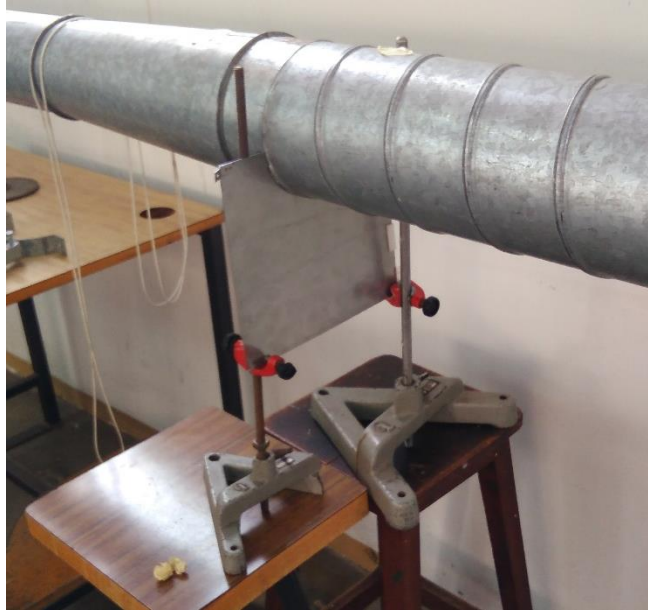


Fig. 4.2: Col·locació de la placa que fa la funció de vàlvula.

Per la recollida de dades s'utilitza un micròfon, encarregat de detectar la pressió a dins del conducte. S'introdueix a l'interior del conducte pels cinc punts indicats a l'esquema de la Fig. 4.1 i a l'extrem obert a l'atmosfera de manera que detecti les ones de pressió generades pel flux d'aire, tal com es mostra a la Fig. 4.7 (pàg. 31). Les dades recollides pel micròfon es transmeten al mòdul d'adquisició de dades, que s'encarrega de fer el condicionament, per tal que les dades que proporciona el micròfon puguin ser interpretades pel PC, on hi ha el software que s'encarrega del tractament de les dades. En el cas d'aquest projecte el tractament consisteix en transformar les dades que provenen del micròfon del domini temporal al domini freqüencial, que és l'adequat per fer l'anàlisi freqüencial del sistema. El procediment d'adquisició de dades, des que s'excita una freqüència al fluid fins que s'obtenen dades que poden ser tractades pel software instal·lat al PC, es pot esquematitzar de la següent manera:

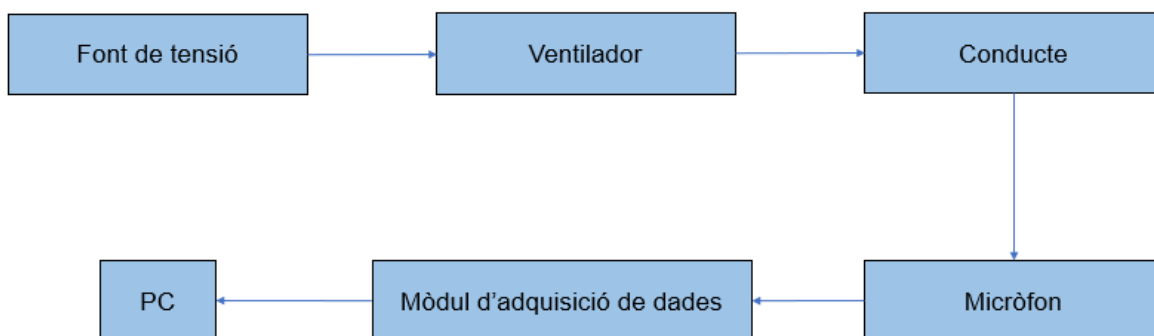


Fig. 4.3: Cadena d'adquisició de dades.

4.2. Freqüències naturals del sistema

Les freqüències naturals del sistema descrit a l'apartat 4.1 es troben a la taula a continuació. S'hi mostren les freqüències corresponents als primers cinc modes, calculades amb les expressions (3.2) i (3.4) (pàg. 15).

Mode	$f_{\text{entrada tancada}} \text{ (Hz)}$	$f_{\text{entrada oberta}} \text{ (Hz)}$
1r (fonamental)	15'75	31'50
2n	-	63'00
3r	47'25	94'50
4t	-	126'00
5è	78'75	157'50

Taula 4.1: Freqüències dels primers cinc modes del sistema calculades analíticament.

Pel sistema real la freqüència corresponent a cada harmònic s'ha de trobar dins l'interval de referència que acoten les freqüències trobades pels sistemes amb l'entrada tancada i oberta, respectivament.

La selecció del mode que s'estudiarà experimentalment està condicionada per dos factors: d'una banda depèn de les freqüències que es puguin excitar mitjançant el ventilador del que es disposa, que es determinaran als apartats a continuació. D'altra banda s'ha de tenir en compte que per obtenir els resultats desitjats al laboratori és necessari mesurar la pressió a diferents punts del conducte per determinar la forma d'ona i la posició dels pics de pressió. Com més elevat sigui l'harmònic amb el que es treballi, més nodes i antinodes tindrà l'ona resultant, cosa que complica l'obtenció de resultats perquè serà necessari fer més mesures per determinar la forma d'aquesta. És per això que l'opció que més facilita la feina al laboratori és treballar amb el mode fonamental del sistema, que és el que generarà una funció d'ona més simple, amb un sol antinode.

En conclusió, al laboratori s'excitarà el mode fonamental del sistema, sempre que el ventilador ho permeti. Aquest mode té una freqüència natural associada, que com mostra la Taula 4.1

s'espera que estigui acotada entre les freqüències de 15'75 Hz i 31'51 Hz i tindrà un valor que depèn de l'efecte del ventilador sobre el sistema, actualment desconegut. A més, s'espera que l'ona generada a l'interior del tub presenti un sol antinode al punt central, la pressió del qual augmentarà marcadament en el moment que s'exciti la freqüència natural. Per tant és necessari que el ventilador que s'utilitzi sigui capaç d'excitar freqüències en aquest rang.

4.3. Instrumentació

A continuació es tractarà amb més detall els elements que formen part de la cadena d'adquisició que s'utilitza per obtenir les dades necessàries per fer l'anàlisi freqüencial del sistema estudiat.

4.3.1. Font de tensió

S'ha utilitzat una font de tensió contínua *Hewlett Packard E3611A*. La seva funció és alimentar el ventilador, i d'aquesta manera controlar-ne la velocitat de rotació. Té una precisió de 100mV i pot proporcionar una tensió màxima de 20V a 1'5A. Les característiques del model es poden veure amb més detall a l'annex.



Fig. 4.4: Imatge de la font de tensió contínua utilitzada.

4.3.2. Ventilador

El ventilador utilitzat per excitar freqüències en el sistema és un ventilador axial de set àleps controlat amb una font de tensió variable. Té un motor de corrent contínua limitat a una tensió màxima de 12V. El motor no admet una tensió d'alimentació superior, de manera que encara que s'augmenti per sobre de 12V la velocitat de rotació del ventilador no augmentaria. La tensió mínima a la qual es pot alimentar el motor per tal que l'eix tingui una rotació constant és de 6V. Per tensions per sota d'aquest valor l'alimentació no és prou potent com per mantenir la velocitat de rotació del ventilador a valors constants, de manera que no es pot excitar freqüències constants en el fluid. Les característiques detallades del ventilador es troben al full de característiques del model, a l'annex.

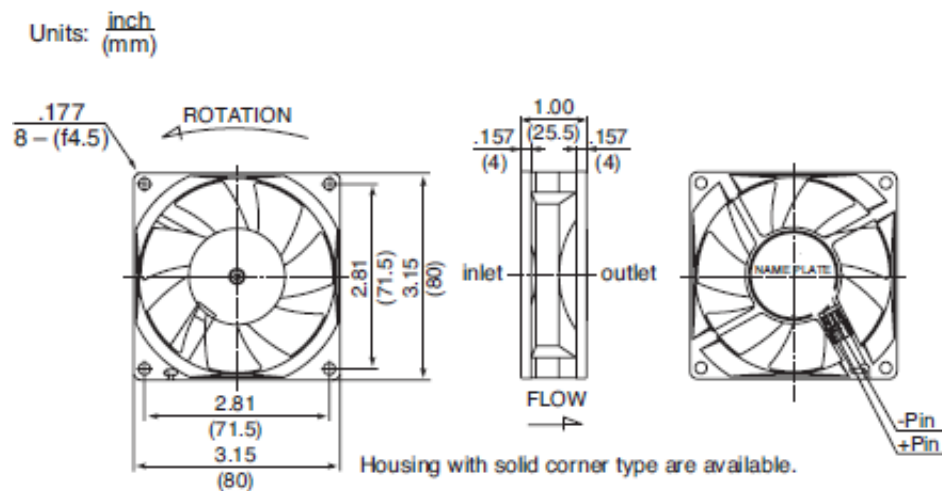


Fig. 4.5: Característiques físiques del ventilador.

Un ventilador axial com l'utilitzat és capaç d'excitar freqüències en un fluid a partir de la rotació dels seus àleps. Quan l'eix rota força que l'aire que està en repòs en un dels seus extrems es desplaci a l'altre extrem passant a través d'un dels seus canals. En aquest procés les partícules d'aire s'acceleren, de manera que surten empeses per l'altre extrem del ventilador amb una velocitat superior que la que tenien en el moment d'entrar. Cada vegada que es produeix aquest procés es genera un desplaçament a les partícules de l'interior del conducte, que es propaga a través de la longitud del tub formant ones de pressió. La freqüència amb què el ventilador genera aquests impulsos depèn, principalment, de la velocitat de rotació del ventilador i del nombre de canals del ventilador. Per tant, controlant la velocitat de rotació del ventilador i els canals per on es permet passar a l'aire és possible generar impulsos a diferents freqüències. Quan la freqüència generada

coincideixi amb alguna de les freqüències naturals del sistema, aquest entrarà en ressonància i es detectarà un augment de l'amplitud de les ones de pressió a l'interior del conducte.



Fig. 4.6: Imatge del ventilador instal·lat al sistema.

4.3.3. Micròfon

Per tal de mesurar la pressió a l'interior del conducte s'ha utilitzat un micròfon *Brüel & Kjaer type 4957*. La seva funció és convertir les ones acústiques que detecta en senyals elèctrics, que seran tractats posteriorment mitjançant el software *Pulse LabShop*. Per prendre les mostres el micròfon s'activa durant un cert període de temps, en el qual es prenen mostres separades en intervals regulars. La durada d'aquest període, així com la de l'interval que separa dues mostres consecutives determinen la quantitat total de dades recollides, que posteriorment seran tractades.

Les característiques detallades del transductor es troben a l'annex, però a continuació se'n destaquen algunes de les més importants:

- Rang dinàmic: 32 – 134 dB (0'7962 mPa – 79'62 Pa)
- Soroll inherent: < 32 dB (0'7962 mPa)
- Dimensions físiques:
 - Longitud: 34 mm
 - Diàmetre: 7 mm

El diàmetre és una magnitud que s'ha de tenir en compte, perquè els forats fets al tub han de ser prou grans per poder introduir-lo però tan petits com sigui possible per generar el mínim de distorsions possibles en el comportament del fluid.



Fig. 4.7: Imatge del micròfon instal·lat a la sortida del conducte.

4.3.4. Mòdul d'adquisició de dades

Les dades mesurades pel sensor es recullen i es transmeten a l'ordinador mitjançant el mòdul *Brüel & Kjær type 3057*. Les especificacions completes es poden consultar a l'annex, però algunes de les seves característiques més importants són:

- Canals d'entrada: 12
- Rang de freqüències: 0 – 25'6 kHz



Fig. 4.8: Mòdul d'adquisició de dades utilitzat.

4.4. Programari

4.4.1. Pulse LabShop

Les dades s'han pres mitjançant el software Pulse Labshop de Brüel & Kjaer. Amb aquest programa s'han definit els paràmetres segons els quals s'ha realitzat la recollida de dades, com ara el tipus de transductor utilitzat, el tipus d'anàlisi o la freqüència de mostreig, així com també s'ha utilitzat pel control dels intervals en què les lectures provinents del micròfon s'emmagatzemen.

A mesura que el programa rep dades provinents del transductor calcula i mostra la FFT instantània, que es renova en intervals regulars de temps i es fa amb les dades recollides en aquest interval. Tot i que aquesta FFT és un bon indicador de si les dades que es recullen són consistents al llarg de l'interval de presa de mostres no és del tot fiable a l'hora de determinar amb precisió els coeficients de la transformada de l'ona de pressió que es mesura, ja que es mesura amb un conjunt de dades recollides en un interval molt petit. Es pot considerar una "fotografia" que proporciona informació d'un instant determinat, però com que l'ona varia amb el temps les FFT obtingudes en dos instants diferents poden tenir variacions. Per tal d'obtenir una transformada que no depengui del moment concret en què s'ha fet la mesura s'han emmagatzemat les mostres mesurades durant un interval d'un minut i s'han tractat totes en conjunt utilitzant el software BK Connect (apartat 4.4.2).

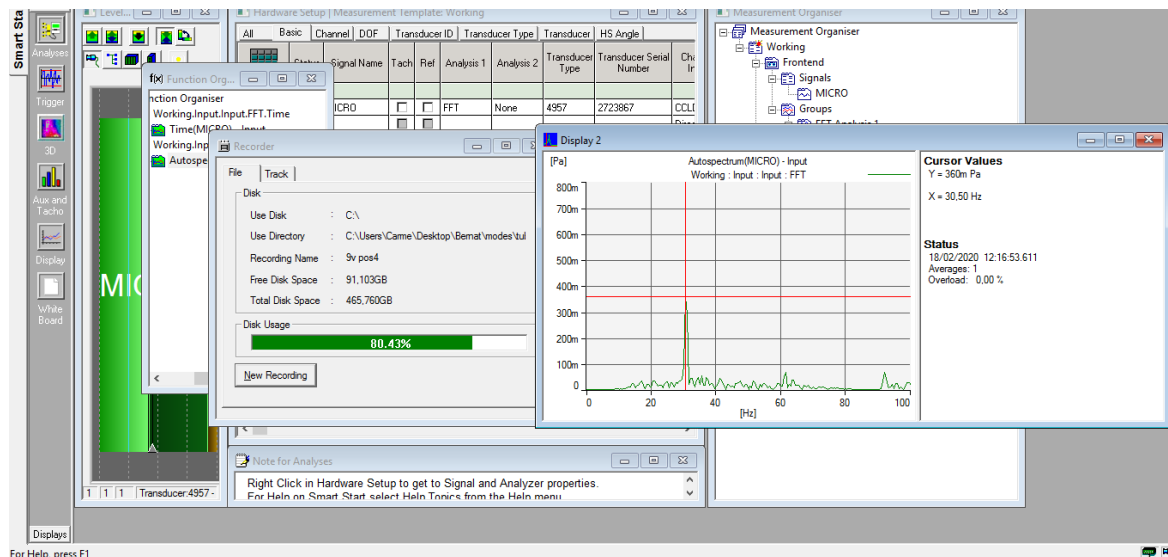


Fig. 4.9: Interfície del Pulse LabShop.

4.4.2. BK Connect

El tractament de les dades recollides s'ha realitzat amb el software *BK Connect* de *Brüel & Kjaer*, desenvolupat pel mateix fabricant del transductor i el software d'adquisició de dades, cosa que assegura la compatibilitat entre els diferents elements de la cadena.

El tractament ha consistit en aplicar la transformada ràpida de Fourier (FTT) a les dades registrades mitjançant el transductor i emmagatzemades amb *Pulse LabShop*. Un cop fet el tractament les dades apareixen en el domini freqüencial, amb un coeficient que representa l'amplada de l'ona de pressió associat a cada freqüència. Les principals característiques de les transformades fetes són les següents:

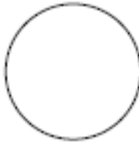
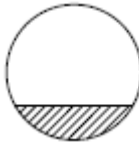
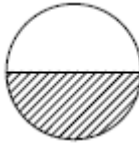
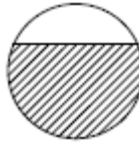
- Rang de freqüències: indica fins a quina freqüència es calcularan coeficients de la sèrie de Fourier. S'ha definit el límit a 400 Hz.
- Resolució: indica l'interval entre freqüències consecutives per les que es calcularan coeficients. S'ha definit a 0'25 Hz.
- Nombre de línies de la FFT: és el nombre total de coeficients de la transformada que es calculen. En aquest cas és de 1600 línies.

Incrementant aquests valors el resultat seria més precís però també es requeriria més capacitat de càlcul de l'ordinador i no és necessari, ja que la precisió obtinguda amb aquestes característiques és suficient per l'anàlisi que es vol fer.

4.5. Experiment realitzat

L'objectiu del procés experimental consisteix en estudiar el sistema per tal de trobar-ne les freqüències naturals i, excitant aquesta freqüència, determinar la distribució de les pressions produïdes al llarg del conducte. Per tal de fer-ho s'ha plantejat el següent procés experimental.

En l'experiment s'estudiaran diferents configuracions del sistema descrit, on es variarà la posició de la planxa per tal d'observar les variacions produïdes en les freqüències pròpies del sistema en funció del grau d'obstrucció. El grau de tancament de la vàlvula, α , indica fins a quina fracció del diàmetre del conducte es bloqueja el pas del flux d'aire. Així, $\alpha = 0$ significa que la vàlvula està totalment oberta i $\alpha = 1$, totalment tancada. Les configuracions estudiades són les següents:

Configuració	Grau de tancament de la vàlvula	Secció
0	$\alpha = 0$	
1	$\alpha = 0'33$	
2	$\alpha = 0'5$	
3	$\alpha = 0'67$	

Taula 4.2: Configuracions de la vàlvula que s'estudiaran durant l'experimentació.

Les freqüències naturals del sistema es troben excitant diferents freqüències en el fluid que omple el conducte objecte d'estudi. Per cadascuna de les freqüències excitades es prendran mostres de pressió en diferents punts del conducte. Les tensions d'alimentació del ventilador i els punts del conducte on es prenen les mostres són els següents:

Punt de presa de dades	Posició
Punt 1	$z = 1,35 \text{ m}$
Punt 2	$z = 2,12 \text{ m}$
Punt 3	$z = 2,58 \text{ m}$
Punt 4	$z = 3,52 \text{ m}$
Punt 5	$z = 4,67 \text{ m}$
Punt 6	$z = 5'40 \text{ m}$

Taula 4.3: Posició dels punts de mesura.

Tensions d'alimentació:
6V
7V
8V
9V
10V
11V
12V

Taula 4.4: Tensions d'alimentació aplicades al ventilador.

Idealment s'haurien d'agafar les mostres de pressió a tots els punts de presa de dades al mateix temps per cadascuna de les tensions d'alimentació, per tal d'evitar al màxim distorsions en les mostres, però donat que només hi ha un únic micròfon disponible les mostres s'han hagut d'agafar per separat. Tenint en compte les limitacions, el procediment de presa de dades s'ha dissenyat de manera que durant el procés hi hagi el mínim canvi de posicions del micròfon possible, i d'aquesta manera evitar interferències amb el sistema que podrien falsejar les dades, portant a errors en els resultats. Per tal de mantenir la consistència del mètode s'ha seguit en tot moment el mateix procediment, indicat a continuació:

1. Col·locació del micròfon a la posició adequada. La primera mostra s'agafa al punt 1. Les obertures a les posicions on no hi ha el micròfon es tapen amb cinta aïllant per evitar distorsions degudes a pèrdues de flux.
2. Presa de mostres. Es comença amb una tensió d'alimentació de 6V i es pren la mostra durant un interval d'un minut.
3. Sense tocar cap element del sistema s'augmenta la tensió d'alimentació fins a 7V i es pren una nova mostra amb el mateix interval de temps. Es repeteix el procediment fins a obtenir mostres per totes les tensions d'alimentació desitjades.
4. Un cop es tenen totes les mostres d'una posició es posa la tensió d'alimentació a 6V i es canvia el micròfon a la següent posició en ordre ascendent. Es repeteixen els punts 2 i 3 fins que es tenen les mostres de totes les posicions.

Un cop s'han pres les dades toca tractar-les per treure'n la informació que es busca. Les dades que agafa el micròfon són mesures preses periòdicament durant un determinat interval de temps, i per tant proporciona una sèrie de lectures de pressió que depenen de l'instant de temps en què s'han pres, és a dir, en el domini temporal. L'interès d'aquest projecte, però, no és estudiar l'evolució de la pressió en el temps, sinó veure com varia aquesta en funció de la freqüència del fluid a l'interior del sistema. És per això que cal transformar les dades del domini temporal al domini freqüencial. Això es fa utilitzant la transformada de Fourier, que permet veure quina contribució té cada freqüència en el senyal.

4.6. Preparació de l'experiment

Abans de realitzar l'experimentació és necessari comprovar que és possible excitar el sistema a la freqüència necessària per produir ressonància amb el ventilador i el sistema de control disponibles.

De l'apartat 3.1.2 s'ha tret la conclusió que la freqüència natural fonamental del sistema amb la vàlvula oberta ha de trobar-se en l'interval entre la freqüència fonamental d'un tub amb un extrem obert i l'altre tancat i la d'un tub amb els dos extrems oberts. Malgrat que l'efecte del ventilador en la freqüència natural del sistema és desconegut, s'ha pressuposat que ja que l'aire flueix a través dels dos extrems del conducte les freqüències naturals del sistema format pel tub i el ventilador han de ser més properes a les d'un tub obert pels dos extrems que no pas a les d'un tub només obert per un extrem. Assumint aquesta hipòtesi és necessari que amb el ventilador es pugui excitar en el fluid una freqüència al voltant de 31'50 Hz, la freqüència natural fonamental d'un tub obert pels dos extrems. En cas que la hipòtesi que la freqüència natural del sistema varia quan en tanca la vàlvula també és important que amb el ventilador es puguin excitar freqüències al voltant de la fonamental del sistema per la vàlvula completament oberta. A continuació s'estudia, doncs, el comportament del ventilador i quines freqüències excita en l'aire que hi passa a través.

Les especificacions del ventilador situen el seu rang de funcionament entre les tensions d'alimentació de 6 a 12 volts. Per tal de determinar les freqüències que s'exciten en el fluid s'ha instal·lat el ventilador a l'inici d'un tram de 2'35 m del conducte que forma part del sistema. El motiu que aquesta part de l'experimentació s'hagi fet amb una secció del conducte, enlloc de fer-ho amb el conducte sencer, és només que és més senzill treballar amb un tub més curt. La llargada o la geometria del tub on es mesuri no té cap efecte sobre la freqüència que s'excita en el fluid de l'interior. Sí que poden afectar a la pressió que es detecti al micròfon, ja que escurçant el tub es canvia la freqüència natural i per tant també la manera com el fluid interacciona amb el conducte, però en aquest cas la pressió és un valor irrellevant.

Per tant, en aquesta part de l'experimentació determinarà quines són les freqüències que excita el ventilador depenent de la tensió d'alimentació que se li proporcioni, i els resultats que s'obtinguin treballant amb el tram inicial del conducte seran vàlids quan es treballi amb el sistema sencer, ja que la freqüència excitada depèn només de la rotació del ventilador, no de les característiques del conducte.

Les mostres s'han pres amb el micròfon instal·lat al final del tub per tensions d'alimentació de 6, 8, 10 i 12 volts. Les FFT de les dades recollides per aquestes freqüències són les que es mostren a la següent figura:

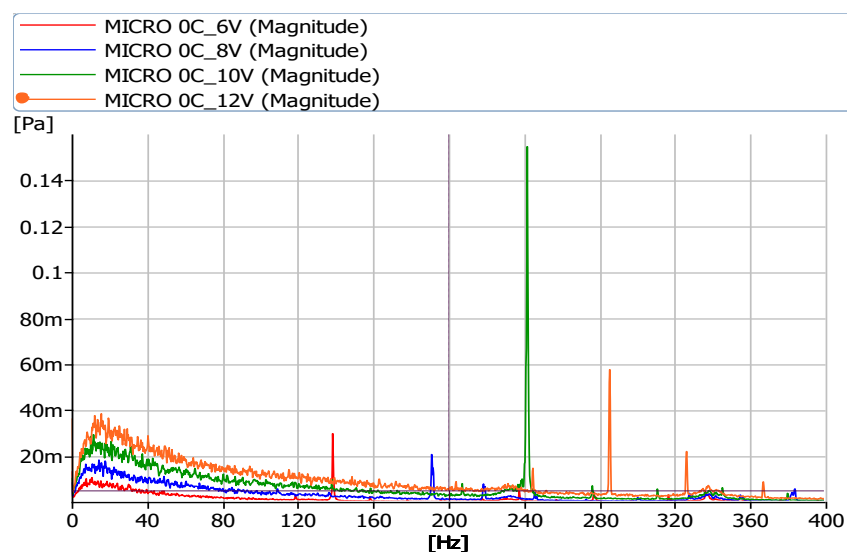


Fig. 4.10: FFT de les dades recollides a les diferents tensions aplicades al ventilador.

La FFT mostra que després d'una etapa on es detecta soroll a baixes freqüències els coeficients de Fourier s'estabilitzen a valors propers a zero exceptuant certes freqüències on hi ha pics que sobresurten. Aquestes són les freqüències que el ventilador està excitant a l'aire, que són diferents a cada tensió proporcionada degut a que estan relacionades amb la velocitat de rotació del ventilador. Les freqüències on es troben els pics per les diferents tensions d'alimentació són les següents:

Tensió (V)	Freqüència (Hz)
6 V	138 Hz
8 V	193 Hz
10 V	241 Hz
12 V	285 Hz

Taula 4.5: Freqüències excitades a les tensions subministrades.

La Taula 4.5 mostra que les freqüències excitades pel ventilador són massa altes, tenint en compte que les freqüències que es busquen són al voltant de 31 Hz, de manera que és necessari trobar una manera de modificar el comportament del ventilador per d'excitar freqüències en un rang més baix. Una observació interessant sobre els resultats obtinguts és que les freqüències que s'han excitat són igual a la velocitat de rotació de l'eix del ventiladora cada tensió d'alimentació multiplicada per set, que és el nombre d'àleps. Això es deu a que cada vegada que l'eix del ventilador fa una rotació l'aire que passa a través de cada canal genera una zona de compressió. Com que hi ha set canals, per cada període de rotació de l'eix del ventilador l'ona generada té set períodes, ja que un període de l'ona és igual a el temps que hi ha entre dues zones de compressió. Per tant, com que la freqüència d'una ona és la inversa del seu període, la freqüència de l'ona (és a dir, la que s'excita al fluid), és set vegades la freqüència de rotació del ventilador.

Per tal de desplaçar el rang de freqüències excitades als valors que es vol arribar és necessari fer modificacions al ventilador per tal que les freqüències que s'excitin no estiguin relacionades amb el nombre d'àleps, sinó només depenguin de les velocitats de rotació de l'eix. Una manera senzilla d'aconseguir-ho és creant desequilibris a la sortida del ventilador a base de bloquejar canals d'entrada, de manera que quan el ventilador estigui en funcionament l'aire només pugui circular pels canals oberts i així el comportament del fluid a la sortida variï respecte al que té quan tots els canals són oberts, excitant freqüències en un nou rang.

Així, s'ha seguit el mateix procediment explicat prèviament per obtenir les FFT del flux que surt del ventilador quan a aquest se li ha obstruït un canal. El resultat és el següent:

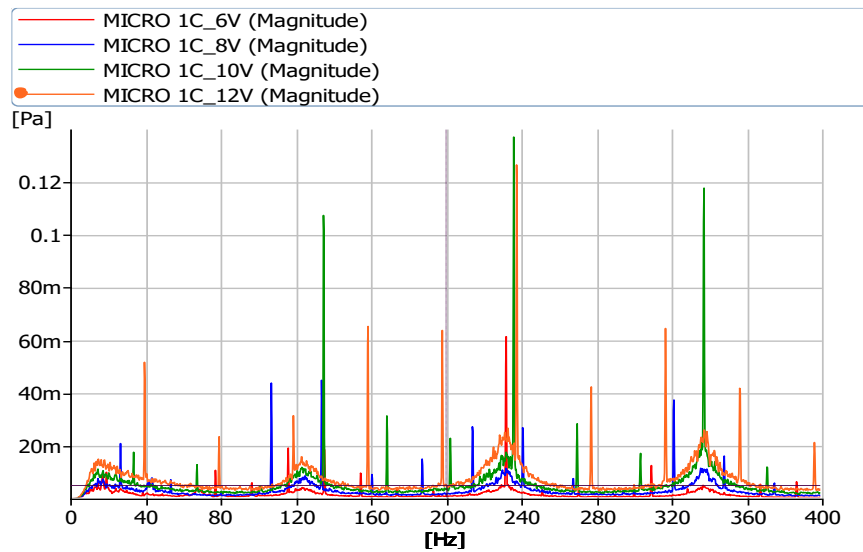


Fig. 4.11: FFT de les dades mesurades amb un canal del ventilador tancat

La comparació entre les freqüències excitades obstruint un canal i les excitades originalment es mostra a la següent figura:

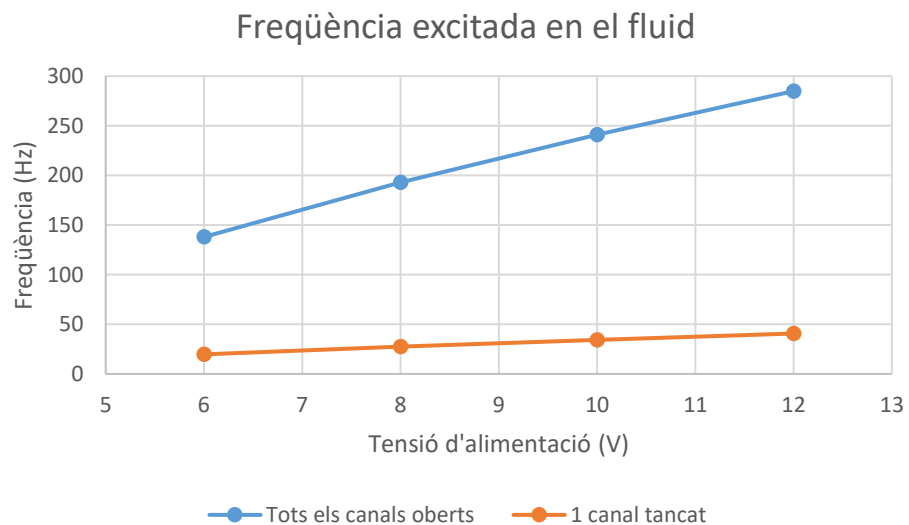


Fig. 4.12: Comparació de les freqüències excitades.

Els resultats mostren que, efectivament, quan s'obstrueix un dels canals del ventilador les freqüències excitades en el sistema són diferents que anteriorment. En aquest cas les freqüències fonamentals es troben en el rang de 0 Hz a 50 Hz, amb harmònics apareixent a freqüències més elevades a intervals regulars. Les freqüències excitades a cada tensió d'alimentació donada són les següents:

Tensió (V)	Freqüència (Hz)
6 V	19'75 Hz
8 V	27'50 Hz
10 V	34'50 Hz
12 V	40'75 Hz

Taula 4.6: Freqüències excitades amb un canal del ventilador tancat.

Els resultats aconseguits amb un canal obstruït al ventilador ja es troben dins del rang on s'espera trobar la freqüència natural del sistema. Si es comparen amb els resultats de la Taula 4.5 es pot comprovar que les freqüències excitades després de tancar un canal al ventilador són igual a les freqüències obtingudes quan hi havia tots els canals oberts dividides entre set, cosa que indica que la freqüència que es força al sistema és la freqüència de rotació de l'eix del ventilador. Amb el ventilador treballant d'aquesta manera és possible trobar la freqüència que es busca i comprovar si la hipòtesi segons la qual varia en funció del grau de tancament de vàlvula es compleix.

4.7. Resultats

A continuació es presenten els resultats obtinguts durant l'experimentació, separats en les diferents configuracions del sistema que s'han estudiat.

4.7.1. Configuració 0

Per la posició 0, amb la vàlvula completament oberta, els resultats de l'anàlisi freqüencial són els que es mostren a continuació.

A la Fig. 4.13 es pot veure el gràfic corresponent a la FFT del sistema al punt 3, situat al mig del conducte.

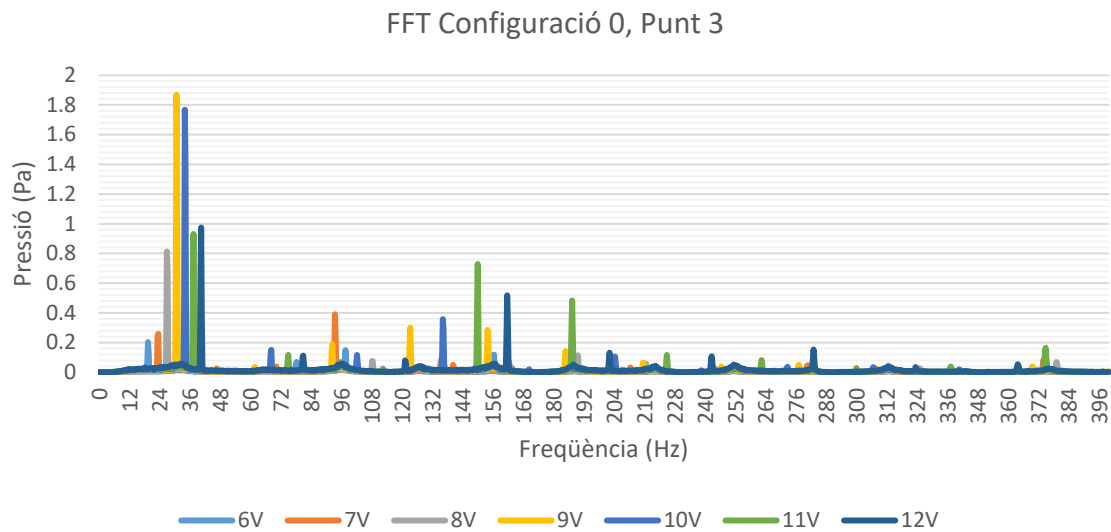


Fig. 4.13: FFT del sistema a la configuració 0.

El comportament de la FFT és similar per totes les tensions d'alimentació: es manté a 0 exceptuant pics que es donen a freqüències concretes i que, a més, es produeixen en intervals regulars. Cadascun d'aquests pics és un harmònic de l'ona produïda dins el sistema. L'harmònic fonamental és l'harmònic de més baixa freqüència, i per tant en una FFT correspon al primer pic que es produeix. La FFT de la Fig. 4.13 té un rang de 400 Hz, però els harmònics fonamentals es distribueixen en un rang molt més petit, entre 10 i 50 Hz, de manera que a partir d'ara els gràfics de les FFT es presentaran en un rang de freqüència més limitat, que permetrà veure amb més claredat els harmònics fonamentals, que són en els que es centra aquest projecte. La següent figura mostra la mateixa FFT que a la Fig. 4.13, però en aquest cas s'ha reduït l'interval de freqüències que es mostren de manera que es mostra en detall l'harmònic fonamental de les diferents tensions d'alimentació.

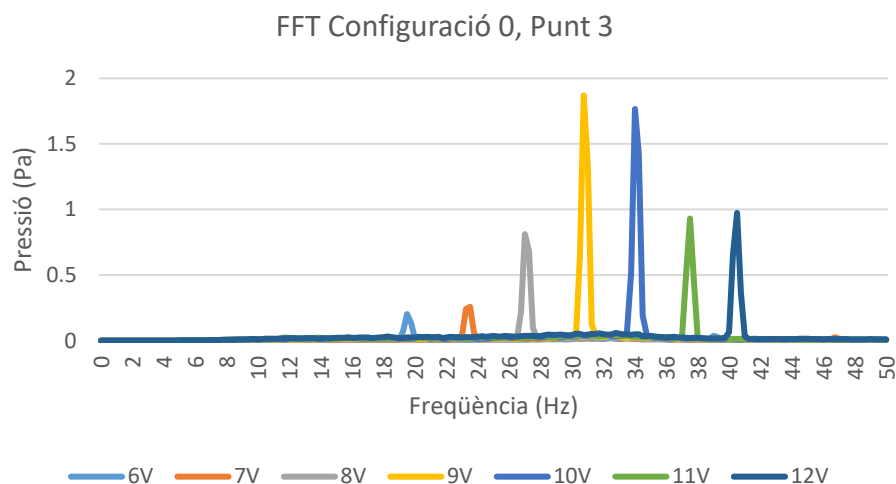


Fig. 4.14: Detall de la Fig. 4.13 en el rang entre 0 Hz i 50 Hz.

A la Fig. 4.14 es pot observar amb claredat com evoluciona la FFT del sistema per diferents tensions d'alimentació. Cadascuna de les tensions força una determinada freqüència a l'aire de l'interior del conducte. Aquestes freqüències corresponen als pics que s'observa a la figura. Com a conseqüència de la interacció de l'aire amb el conducte la pressió que es forma s'amplifica o s'atenua fins a arribar a un determinat valor, en funció de com de properes siguin la freqüència forçada en el fluid i la freqüència natural del sistema.

Per tant, forçant diferents freqüències a l'aire mitjançant canvis en la tensió d'alimentació del ventilador i escollint el punt on es troba el pic per cadascuna de les pressions es troba una corba que indica les freqüències excitades pel ventilador i l'amplada de l'ona de pressió generada a cadascuna d'elles. Això permet La corba obtinguda a partir de la Fig. 4.14 és la següent:

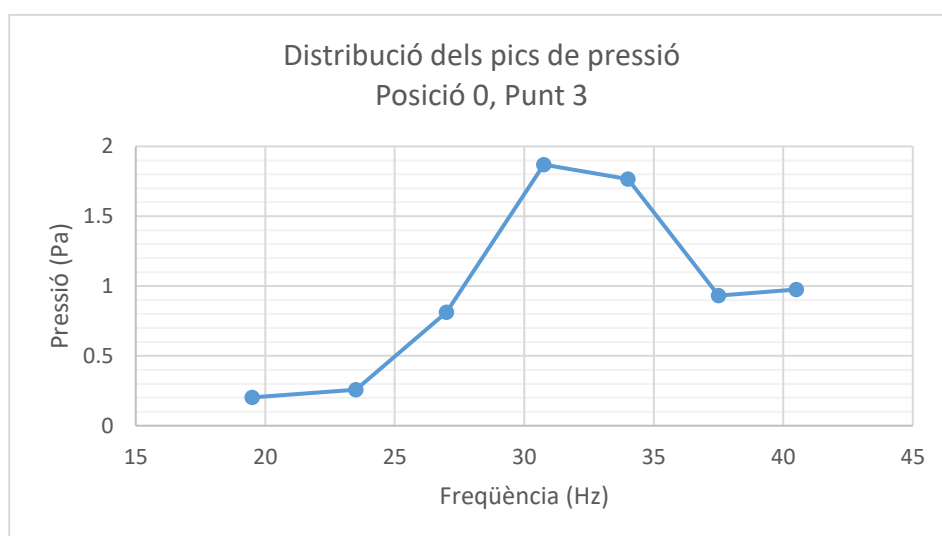


Fig. 4.15: Corba formada pels pics obtinguts a les FFT del sistema a la configuració 0.

La Fig. 4.15 mostra com evolucionen els pics de pressió per les diferents freqüències induïdes en el fluid. El pic de la corba es troba a una freqüència de 30'75 Hz. A aquesta freqüència l'ona de pressió generada té una amplitud de 1'87 Pa. Aquesta és la freqüència excitada en el fluid a una tensió d'alimentació de 9V. Per tensions d'alimentació diferents la pressió disminueix, cosa que indica que la freqüència induïda s'allunya de la freqüència natural fonamental del sistema.

Seguint el mateix procediment que a la Fig. 4.15 s'obté la Fig. 4.16, on es mostren les corbes obtingudes a partir dels pics de les FFT mesurades als diferents punts de presa de mostres. Recordem que en el cas de la configuració 0 no s'ha mesurat la pressió al punt 2 perquè es troba molt proper al punt 3, i per tant només és interessant utilitzar-lo quan la vàlvula es tanca per veure les diferències entre les zones d'abans i després d'aquesta. Es pot observar que el comportament de la FFT és similar en tots els punts de presa de mostres: la pressió màxima s'ha mesurat a una freqüència de 31 Hz a gairebé tots els punts i, en general, al punt 3 es mesuren les pressions més altes a totes les freqüències excitades.

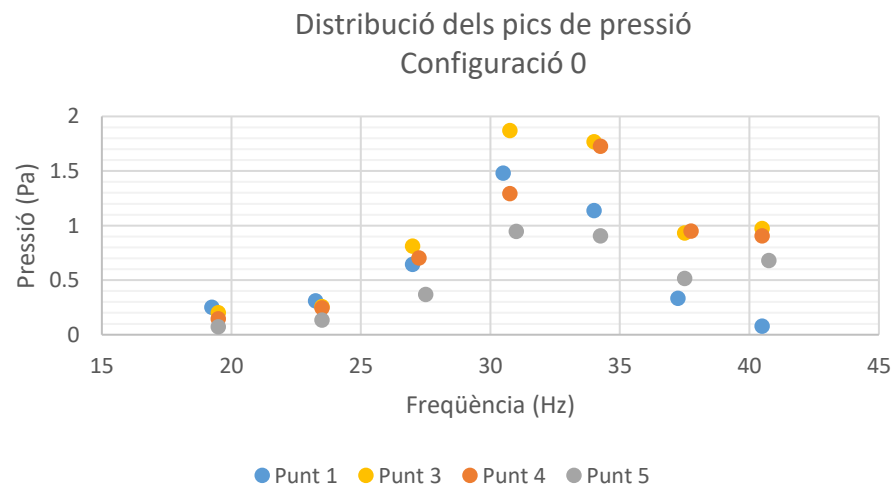


Fig. 4.16: Pics de la FFT als diferents punts de mesura a la configuració 0.

Les corbes mostren que en tres dels quatre punts on s'ha mesurat el màxim de pressió s'ha registrat per una excitació al voltant de 31 Hz, que correspon a una tensió d'alimentació de 9V. En el punt 4, però, el màxim s'ha registrat a una freqüència de 34 Hz, és a dir, a una tensió de 10V. Això fa pensar que la freqüència natural fonamental d'aquesta configuració del sistema no s'ha excitat per cap d'aquestes dues tensions, sinó que en realitat es troba en algun punt entre 31 Hz i 34 Hz. En qualsevol cas aquest interval concorda amb la freqüència que s'ha calculat analíticament a l'apartat 3.1, que per un tub d'aquesta longitud amb els dos

extrems oberts és de 31'48 Hz.

A la següent taula es mostren les freqüències i les pressions on es troben els màxims de les corbes obtingudes als diferents punts de presa de mostres per la posició 0. S'hi mostra també quin percentatge respecte el màxim absolut calculat a la configuració representa la pressió obtinguda a cada freqüència.

Freqüència del mode (Hz)	Punt de mesura on es troba el màxim	Distància del punt de mesura a l'origen (m)	Pressió del màxim (Pa)	% respecte el màxim absolut de pressió
19'5	Punt 1	1'35	0'2502	13'39 %
23'5	Punt 1	1'35	0'3113	16'66 %
27	Punt 3	2'58	0'8267	44'23 %
30'5	Punt 3	2'58	1'869	100 %
34	Punt 3	2'58	1'766	94'49 %
37'5	Punt 4	3'52	0'9338	49'96 %
40'5	Punt 3	2'58	0'9740	52'11 %

Taula 4.7: Característiques de les freqüències excitades a la configuració 0.

La taula mostra que hi ha freqüències amb pressions màximes que destaquen per sobre les altres. En aquesta configuració hi ha la màxima pressió a una excitació de 30'5 Hz, seguida de molt a prop de la freqüència de 34 Hz, que té una pressió de gairebé el 95% del màxim absolut. A més, a aquestes freqüències els màxims s'han mesurat al punt 3, que és el punt més proper al centre del tub, que és el que s'espera d'un mode fonamental. Pel que fa a la resta de freqüències les pressions màximes registrades tenen valors significativament més baixos, de prop del 50% o menors. Aquestes diferències tan marcades es corresponen amb l'augment sobtat de pressió que ha d'aparèixer quan s'excita una freqüència natural, i per tant sembla que la freqüència natural fonamental en aquesta configuració es troba en l'interval entre 30'5 Hz i 34 Hz

Una manera de visualitzar quan s'ha arribat a una de les freqüències naturals del sistema és a través de la forma del mode al llarg del conducte. Es troba a partir de l'amplada del terme

sinusoidal amb la freqüència que s'excita amb una determinada tensió. Per exemple, la Taula 4.7 mostra que per una tensió de 9V la freqüència excitada és de 30'5 Hz. Per tant, per trobar el mode cal agafar els coeficients corresponents a aquesta tensió i a aquesta freqüència a les FFT dels diferents punts en què s'han agafat les mostres. Introduint aquests punts en un gràfic que mostri els coeficients en funció de la posició dels punts de presa de dades s'obté una representació gràfica del mode.

Tal com s'ha vist a la Taula 4.7, les pressions més altes han sigut enregistrades a 30'5 Hz i 34 Hz, que correspon a tensions de 9 V i 10 V, respectivament. Si la freqüència natural del sistema es troba al voltant d'aquestes freqüències els modes haurien de tenir una forma similar al mode fonamental, que s'ha discutit prèviament a l'apartat 3.1.2. Els modes obtinguts experimentalment a les freqüències destacades són els següents:

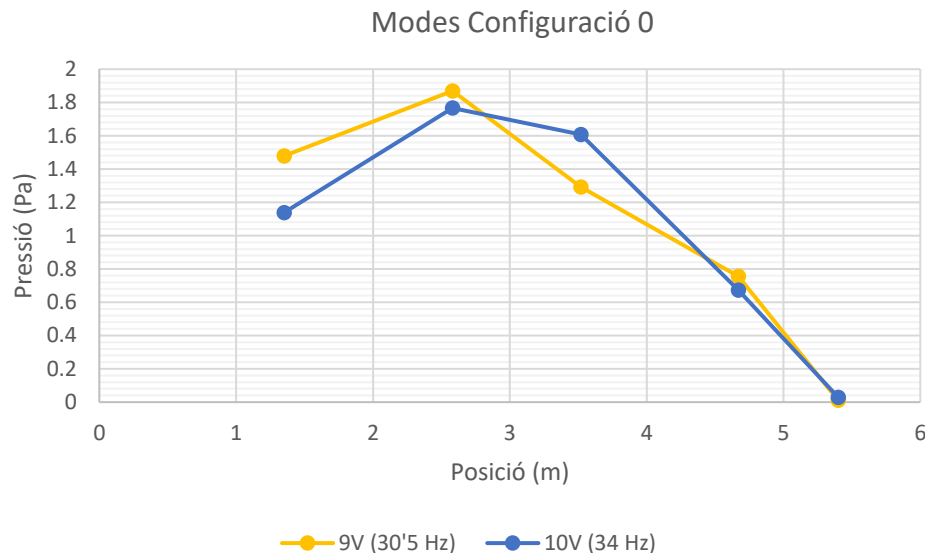


Fig. 4.17: Modes a les freqüències destacades a la configuració 0.

La Fig. 4.17 mostra que els modes a 9 V i 10 V tenen la forma que s'espera per un mode fonamental, amb el màxim al mig del conducte i les pressions més baixes a l'extrem. Al final del conducte la pressió tendeix a zero (és a dir pressió atmosfèrica, recordem que la pressió que es mostra és relativa), ja que l'extrem està obert a l'atmosfera, mentre que al principi la corba indica que la pressió és superior a l'atmosfèrica, probablement degut a la presència del ventilador. Per la resta de les tensions d'alimentació els modes són els que es mostren a la Fig. 4.18.

Els modes obtinguts a les freqüències de 19'5 Hz, 23'5 Hz i 27 Hz tenen el màxim al principi del conducte i un pendent que sempre és negatiu, cosa que juntament a les baixes pressions

mesurades mostra que aquestes freqüències no són naturals del sistema. Els modes a les freqüències de 37'5 i 40'5 Hz, però tenen una forma més similar a la d'un mode fonamental, ja que tenen el màxim al mig del conducte. Tot i la forma dels seus modes, aquestes últimes freqüències també es poden descartar, ja que les pressions obtingudes són significativament més baixes que les obtingudes a les freqüències de 30'5 Hz i 34 Hz.

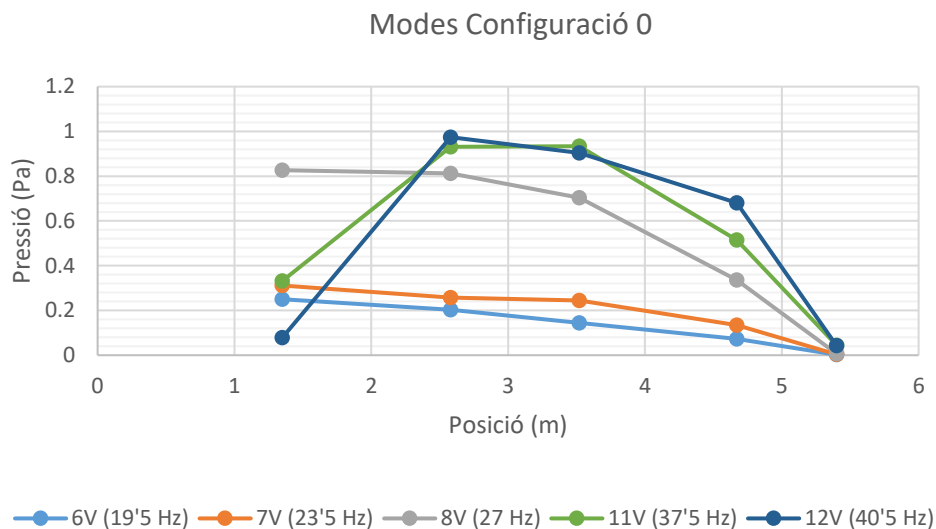


Fig. 4.18: Modes restants a la configuració 0.

En conjunt, veient els resultats obtinguts a la configuració 0 es pot arribar a la conclusió que en aquesta configuració la freqüència natural del sistema es troba acotada en l'interval entre 30'5 Hz i 34 Hz, ja que són les freqüències on la pressió és major i els modes obtinguts són els propis d'un mode fonamental. Pel que fa a l'efecte del ventilador sobre el sistema, les dades obtingudes indiquen que no produeix una variació significativa respecte al d'un tub amb els dos extrems oberts. D'una banda, la freqüència natural fonamental calculada analíticament per un tub amb els dos extrems oberts es troba dins l'interval de freqüències que s'ha determinat experimentalment amb el sistema, i de l'altra els modes obtinguts a aquestes freqüències són els característics d'aquesta configuració, amb nodes als extrems i un antinode al centre. Per tant, tenint en compte les dades es pot considerar el sistema com un tub obert pels dos extrems.

4.7.2. Configuració 1

A la configuració 1 la vàlvula té un grau de tancament del 33%. La FFT en aquesta configuració al punt central del conducte és la següent:

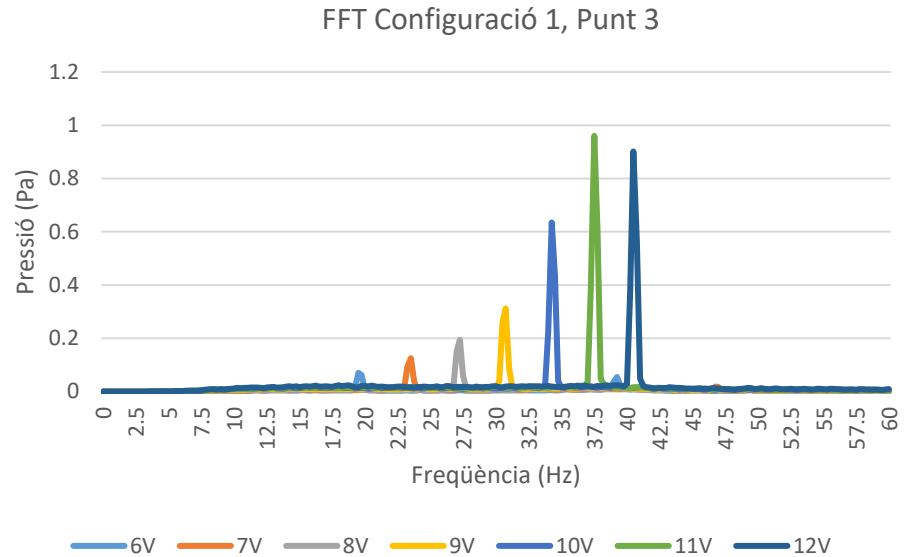


Fig. 4.19: FFT del sistema a la configuració 1.

I la distribució dels pics als diferents punts de presa de dades:

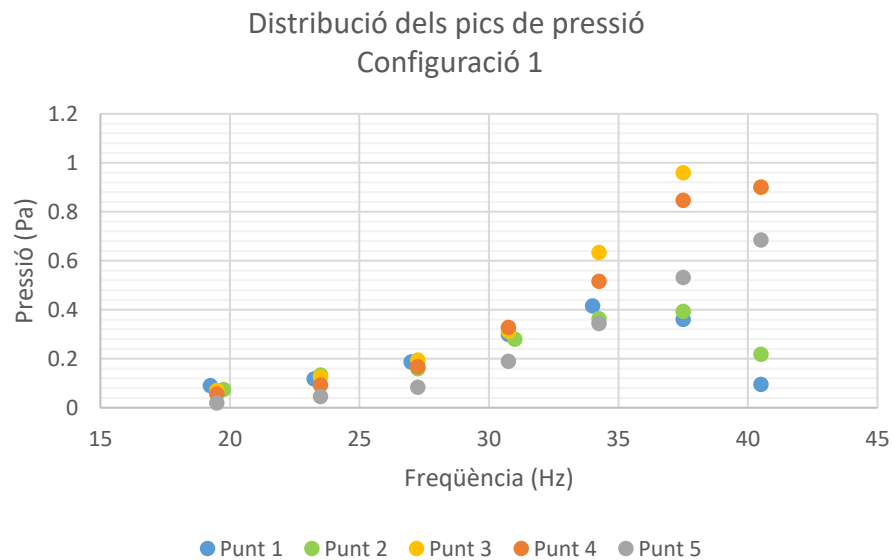


Fig. 4.20: Pics de la FFT als diferents punts de mesura a la configuració 1.

La figura mostra dos comportaments diferenciats entre els punts de presa de dades. D'una banda els punts 1 i 2, que són els que es troben abans de la vàlvula, presenten el màxim entre 34 Hz i 37 Hz, i a partir d'aquesta freqüència la pressió cau. D'altra banda, els punts que es troben després de la vàlvula tenen una trajectòria ascendent en tot el rang de freqüències excitat. Aquesta diferència en el comportament podria ser causat per la vàlvula, ja que les partícules que hi topen i tornen rebotades en direcció contrària poden afectar el comportament de l'ona en els punts del principi del conducte, de manera que les mostres entre aquests punts i els que estan situats després de la vàlvula, i per tant no es veuen afectats per les partícules rebotades, poden presentar diferències.

Freqüència del mode (Hz)	Punt de mesura on es troba el màxim	Distància del punt de mesura a l'origen (m)	Pressió del màxim (Pa)	% respecte el màxim absolut de pressió
19'5	Punt 1	1'35	0'09095	9'47 %
23'5	Punt 2	1'97	0'1341	13'97 %
27	Punt 3	2'58	0'1948	20.29 %
31	Punt 4	3'52	0'3280	34'16 %
34	Punt 3	2'58	0'6349	66.13 %
37'5	Punt 3	2'58	0'9601	100 %
40'5	Punt 3	2'58	0'9014	93'89 %

Taula 4.8: Característiques de les freqüències excitades a la configuració 1.

La Taula 4.8 mostra que a les freqüències de 37'5 Hz i 40'5 Hz s'han registrat les pressions màximes, amb valors molt similars. A més, el punt on s'ha mesurat aquesta pressió és el 3, que es troba al centre del tub, de manera que el mode en aquestes freqüències té el màxim al punt central, tal com ha de ser en un mode fonamental. Pel que fa a la resta de freqüències es veu un descens marcat de la pressió a mesura que s'allunyen de l'excitació de 37'5 Hz. A 34 Hz s'ha registrat una pressió màxima d'un 66% del màxim absolut, i per freqüències menors el percentatge disminueix consistentment. Tal com passa a la configuració 0 per les freqüències més baixes mesurades, de 19'5 Hz i 23'5 Hz, la pressió màxima s'ha registrat als punts de mesura més propers a l'inici del conducte, cosa que indica que el mode que surt

d'aquestes freqüències no és el típic d'una freqüència natural fonamental.

Els modes obtinguts a les freqüències de 37'5 Hz i 40'5 Hz es mostren a la Fig. 4.21.

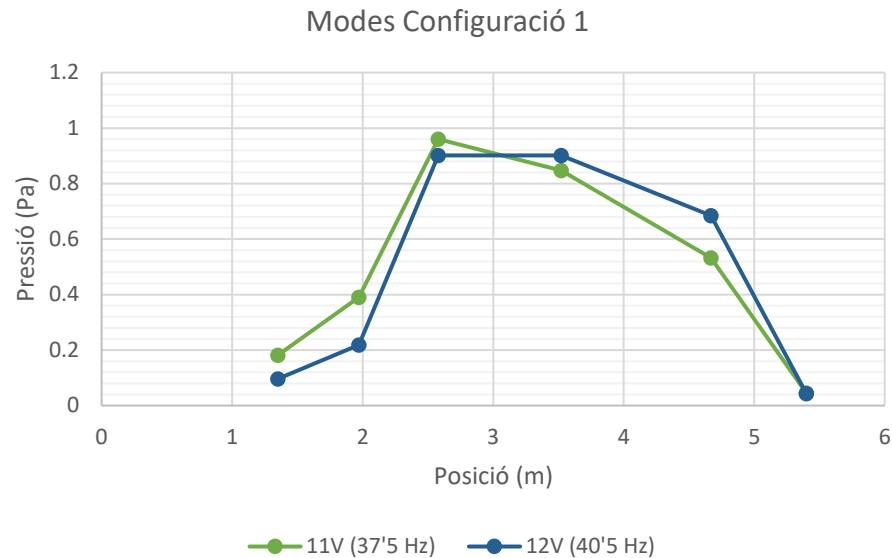


Fig. 4.21: Modes a les freqüències destacades a la configuració 1.

Els modes mostrats a la Fig. 4.21 són propers a el que s'espera per un mode fonamental: les pressions màximes es troben al centre del conducte, i hi ha una reducció de pressió als dos costats del màxim fins a arribar als mínims, que es troben als extrems. Els dos modes tenen una forma propera al mode fonamental, per tant amb les dades recollides es pot concloure que la freqüència natural fonamental en aquesta configuració es troba entre 37'5 Hz i 40'5 Hz.

La resta dels modes es poden veure a la Fig. 4.22. La seva forma confirma que la freqüència natural del sistema no és cap de les freqüències representades, ja que en cap d'elles hi apareix la forma característica, i a més la pressió màxima es troba en nivells significativament més baixos que en les freqüències representades a la Fig. 4.21, tal com mostra la Taula 4.8.

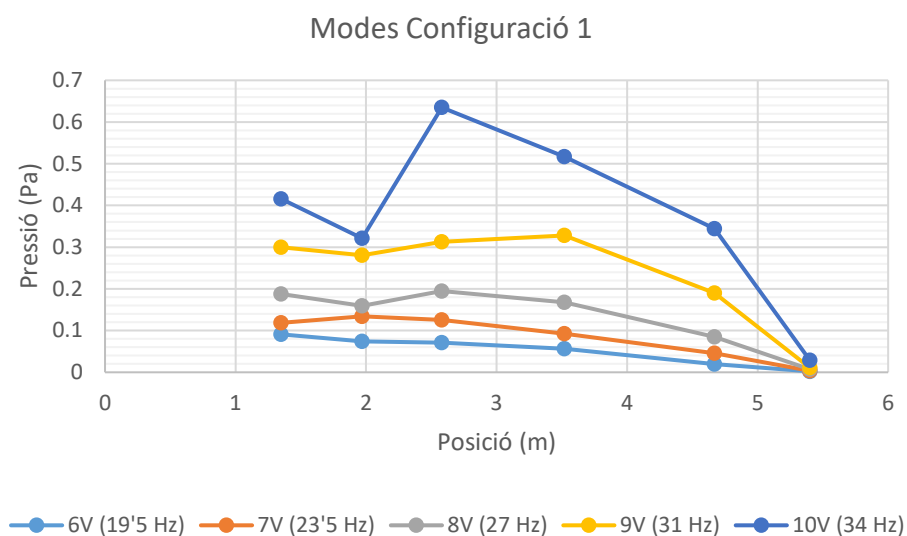


Fig. 4.22: Modes restants a la configuració 1.

4.7.3. Configuració 2

En aquesta configuració la vàlvula està tancada a la meitat. La FFT obtinguda al punt central és la següent.

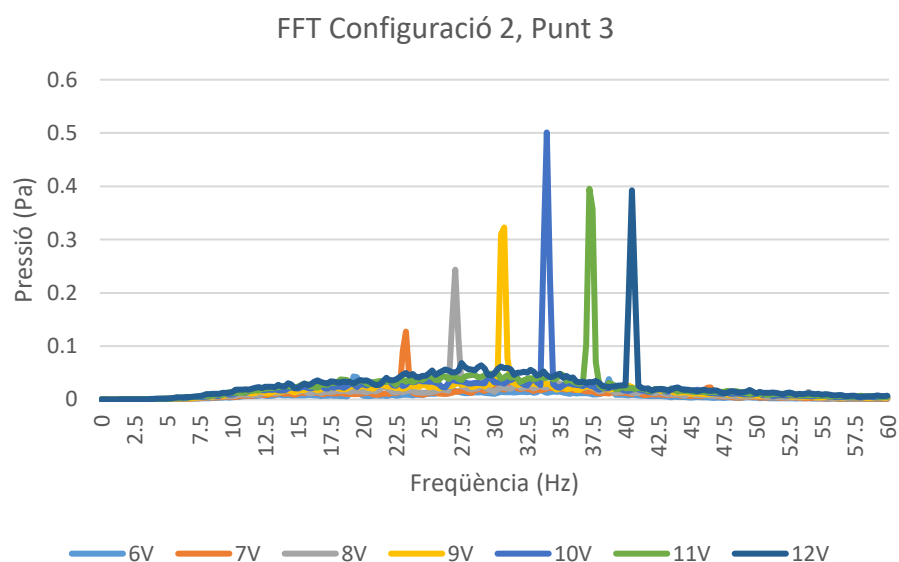


Fig. 4.23: FFT del sistema a la configuració 2.

La FFT mostra que a mesura que la vàlvula es tanca les pressions mesurades amb el micròfon després de la vàlvula són menors, que és un comportament normal, ja que la vàlvula regula el cabal que circula pel conducte, i un menor cabal circulat per una secció constant implica que el fluid es desplaça a una velocitat més baixa, i per tant la pressió al conducte és menor.

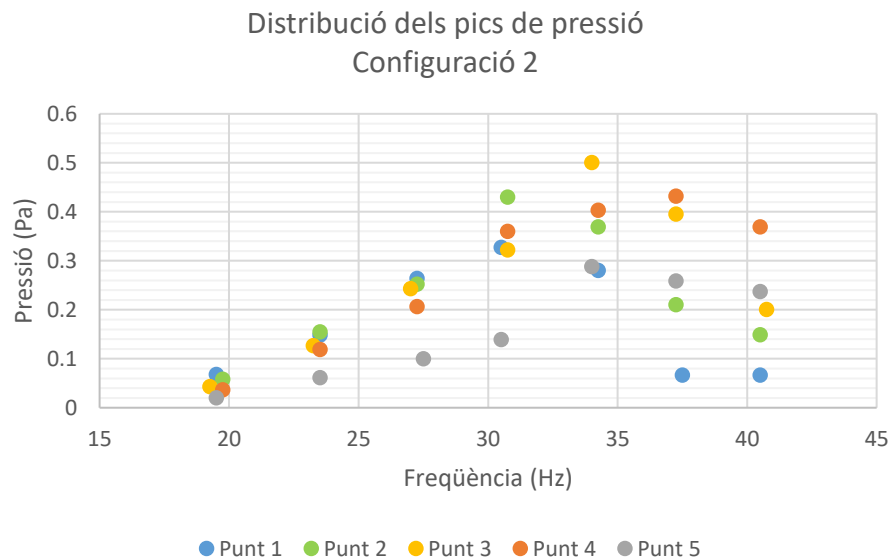


Fig. 4.24: Pics de la FFT als diferents punts de mesura a la configuració 2.

La Fig. 4.24 mostra que les diferències de comportament entre els punts que es troben abans i després de la vàlvula que apareix en la configuració 1 es repeteix en aquesta configuració. En els punts 1 i 2 el màxim de pressió es produeix a una freqüència de 31 Hz, quan la tensió d'alimentació és de 9 volts, i per freqüències més elevades els pics es troben a pressions més baixes. En els punts posteriors a la vàlvula els màxims de les corbes es troben a 34 Hz de freqüència pels punts 3 i 5, i a 37'5 Hz pel punt 4.

Les pressions màximes trobades a les freqüències excitades es troben a la taula a continuació:

Freqüència del mode (Hz)	Punt de mesura on es troba el màxim	Distància del punt de mesura a l'origen (m)	Pressió del màxim (Pa)	% respecte el màxim absolut de pressió
19'5	Punt 1	1'35	0'06851	13'67 %
23'5	Punt 2	1'97	0'1550	30'94 %

27	Punt 1	1'35	0'2642	52'73 %
31	Punt 2	1'97	0'4301	85'85 %
34	Punt 3	2'58	0,5010	100 %
37'5	Punt 4	3'52	0'4320	86'23 %
40'5	Punt 3	2'58	0'3923	78'30 %

Taula 4.9: Característiques de les freqüències excitades a la configuració 2.

La Taula 4.9 mostra que la pressió màxima a les freqüències excitades es troba a 34 Hz. Una diferència apreciable en aquesta configuració és que el màxim absolut no destaca sobre els altres, com passa a les configuracions 0 i 1, en les que la pressió màxima es troba ben delimitada entre dues freqüències consecutives, sinó que en aquest cas hi ha quatre freqüències on s'han obtingut valors similars, de prop del 80% del màxim absolut. Aquestes freqüències es troben en l'interval entre 31 Hz i 40'5 Hz, tres vegades més ample que l'obtingut a les dues configuracions prèvies.

Una altra diferència que apareix en aquesta configuració respecte a les anteriors és que en aquest cas apareixen freqüències dins l'interval de candidates a freqüència natural en les que el punt on s'ha mesurat la pressió màxima no és el punt central del tub. És el cas de les freqüències de 31 Hz i 37'5 Hz.

L'interval que determinen les freqüències on els màxims de les pressions són màximes és massa gran com per acotar la freqüència natural. Per mirar de reduir-lo s'observaran els modes obtinguts a les freqüències que en formen part, que es troben a continuació:

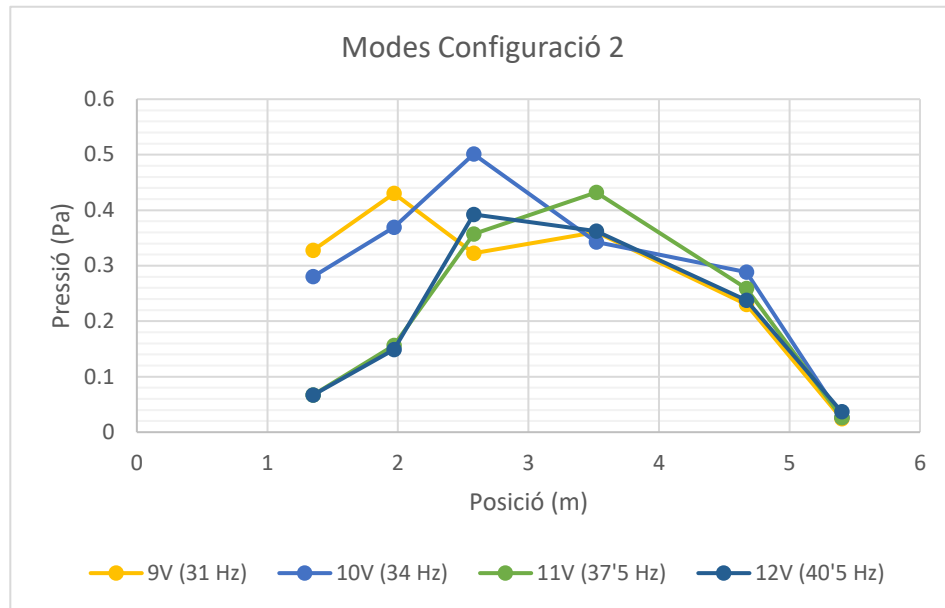


Fig. 4.25: Modes a les freqüències destacades a la configuració 2.

Els modes obtinguts aporten més informació útil. El mode a 31 Hz mostra que la pressió es manté constant des del principi del tub fins passada la meitat, i a partir de llavors cau. Aquest no és el comportament que s'esperaria d'un mode fonamental, que hauria de tenir un màxim al punt mig i pressions descendents pels dos costats fins a arribar a la pressió atmosfèrica als extrems. Sabent això es pot concloure que la freqüència de 31 Hz no és natural d'aquesta configuració, i per tant es pot excloure de l'interval de freqüències candidates.

Pel que fa a la resta de les freqüències de la Fig. 4.25, els resultats no semblen mostrar amb claredat una freqüència natural. D'una banda la freqüència de 34 Hz té un mode que s'aproxima a la forma que ha de tenir el mode fonamental a la primera meitat del conducte, on la pressió té pendent positiu, però a la segona meitat s'observa que hi ha una zona on el mode passa de ser còncav a convex, cosa que no s'ha observat en cap dels modes de les configuracions anteriors. D'altra banda, el mode a 40'5 Hz, tot i no ser on s'ha mesurat la pressió màxima absoluta, té un comportament molt similar que el que mostren els modes de l'interval de freqüències naturals de la configuració 1. En tots dos casos es veu un comportament aparentment diferent entre els punts d'abans i després de la vàlvula, amb pressions baixes als punts 1 i 2, un augment sobtat de la pressió a la zona on hi ha la vàlvula i els punts de la segona meitat del mode que segueixen una paràbola que s'aproxima molt a la forma d'un mode fonamental.

La resta de freqüències, que es mostren a la Fig. 4.26, tenen modes que no segueixen la forma d'un mode fonamental, tal com s'esperava tenint en compte que les freqüències generades són molt baixes.

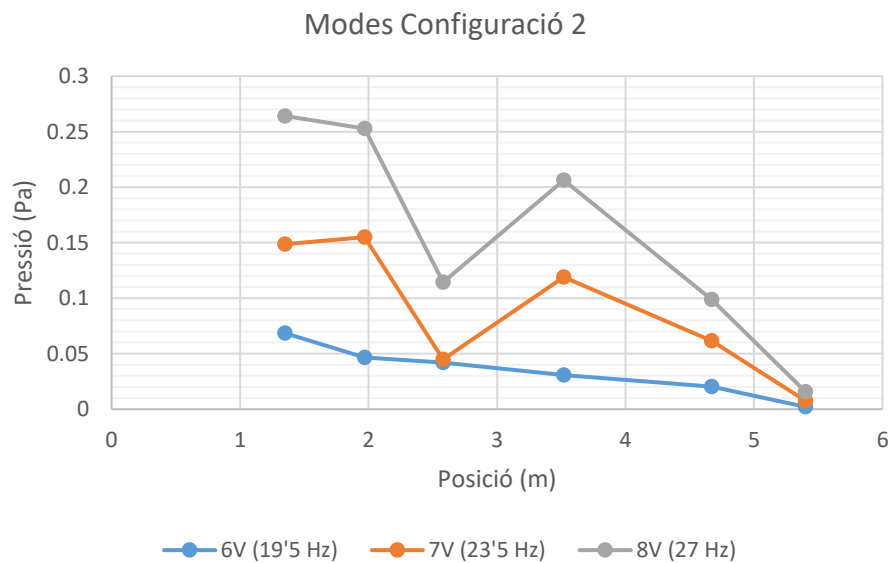


Fig. 4.26: Modes restants a la configuració 2.

En conjunt, es pot observar una progressió en la forma dels modes a mesura que s'augmenta la freqüència, que cada vegada s'aproximen més a un mode fonamental, si més no a la zona de després de la vàlvula. Una possible conclusió, tenint en compte aquesta observació, és que la freqüència natural fonamental d'aquesta configuració es troba fora del rang que el ventilador és capaç d'excitar, i per tant que es troba per sobre de 41 Hz. De ser així, aparentment la freqüència natural tendeix a augmentar a mesura que es tanca la vàlvula, i per tant a la tercera configuració tampoc s'hi hauria d'excitar la freqüència natural.

4.7.4. Configuració 3

A la tercera configuració la vàlvula està tancada a dos terços del diàmetre del conducte. Les pressions obtingudes a la FFT són menors que a les altres configuracions degut a que la vàlvula redueix el cabal circulant pel sistema, així que en aquest sentit les dades són consistents amb el que s'ha obtingut a les altres configuracions.

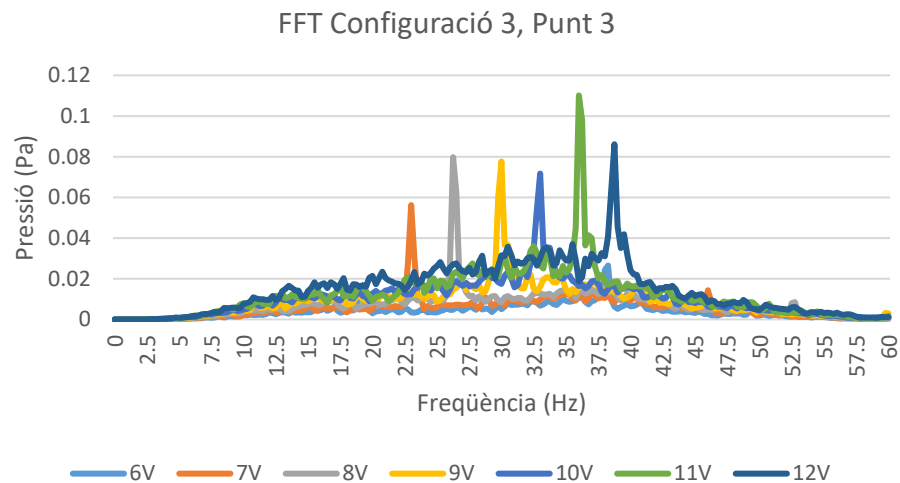


Fig. 4.27: FFT del sistema a la configuració 3.

Les baixes pressions que es llegeixen fan que aparegui soroll a la FFT, tal com es veu a la transformada calculada a partir de les mesures al punt 3. Tot i així es poden distingir els pics que es produeixen a les freqüències excitatees a cada tensió d'alimentació. Les corbes que formen els pics de les FFT als diferents punts es mostren a la següent figura:

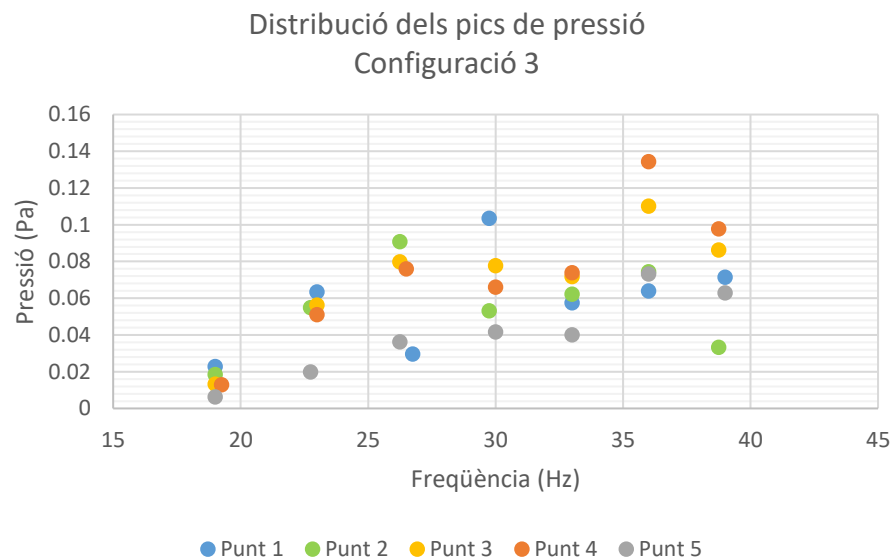


Fig. 4.28: Pics de la FFT als diferents punts de mesura a la configuració 3.

A la Fig. 4.28 es mostren els pics obtinguts per les diferents tensions d'alimentació a les FFT realitzades als cinc punts de mesura. El comportament de les corbes en aquesta configuració

és diferent al que s'ha observat en configuracions prèvies. Mentre que en general les corbes vistes prèviament presenten un sol màxim en el rang en el que estan definides, les obtingudes en aquesta configuració en tenen dos. D'altra banda, les diferències observades prèviament entre els punts d'abans i després de la vàlvula es tornen a produir.

Pels punts 3, 4 i 5 els màxims absoluts de les corbes es troben a 36 Hz, la freqüència excitada alimentant el ventilador a 11 volts. En conjunt aquesta és la freqüència on les pressions són més altes, exceptuant els punts 1 i 2, que presenten màxims absoluts a altres freqüències. En el cas del punt 2 la pressió a 36 Hz és de 0'074 Pa, un 82% del màxim global, de 0'091 Pa, mesurat a una freqüència de 26'5 Hz, mentre que pel punt 1 la pressió a 36 Hz és de 0'064 Pa, un 64% de la pressió al màxim global, de 0'10 Pa, que es troba a 30 Hz.

Freqüència del mode (Hz)	Punt de mesura on es troba el màxim	Distància del punt de mesura a l'origen (m)	Pressió del màxim (Pa)	% respecte el màxim absolut de pressió
19	Punt 1	1'35	0'02266	16'87 %
23	Punt 1	1'35	0'06328	47'19 %
26'5	Punt 2	1'97	0'08058	60 %
30	Punt 1	1'35	0'1033	76'92 %
33	Punt 4	3'52	0.07373	54'90 %
36	Punt 4	3'52	0'1343	100 %
39	Punt 4	3'52	0'09768	72.73 %

Taula 4.10: Característiques de les freqüències excitades a la configuració 3.

Els resultats de la Taula 4.10 mostren que en la configuració 3 les freqüències excitades a les diferents tensions d'alimentació són menors que a les altres configuracions. Per exemple, la tensió d'alimentació de 12V excita freqüències de 40'5 Hz a les configuracions 0, 1 i 2, però a la configuració 3 excita una freqüència de 39 Hz. Aquesta reducció de la freqüència excitada és un fenomen que es repeteix a totes les tensions d'alimentació, però sembla que és més gran a les tensions més elevades.

Pel que fa a les pressions, la pressió més elevada s'ha mesurat a la freqüència de 36 Hz. En

aquest cas, el màxim s'ha mesurat al punt 4, és a dir que no es troba al punt de mesura central. De fet, a cap freqüència s'ha detectat el màxim de pressió al punt central del conducte, cosa que no s'ha vist en les altres configuracions, en les quals la pressió màxima absoluta sempre s'ha registrat al punt 3. Una altra diferència entre aquesta configuració i la resta és que fins ara les pressions màximes mesurades han seguit una progressió ascendent des de la freqüència més baixa excitada, on es registra la pressió més baixa, fins a la freqüència on hi ha la pressió més alta; en aquest cas, però, a la freqüència de 33 Hz hi ha una caiguda de la pressió que trenca la progressió que hi ha entre les freqüències de 19 Hz i 30 Hz, on la pressió màxima va augmentant fins a arribar a prop del 77%

Com s'ha fet amb les altres configuracions a continuació es compararan les distribucions dels pics amb les formes dels modes a les freqüències on hi ha pressions més altes.

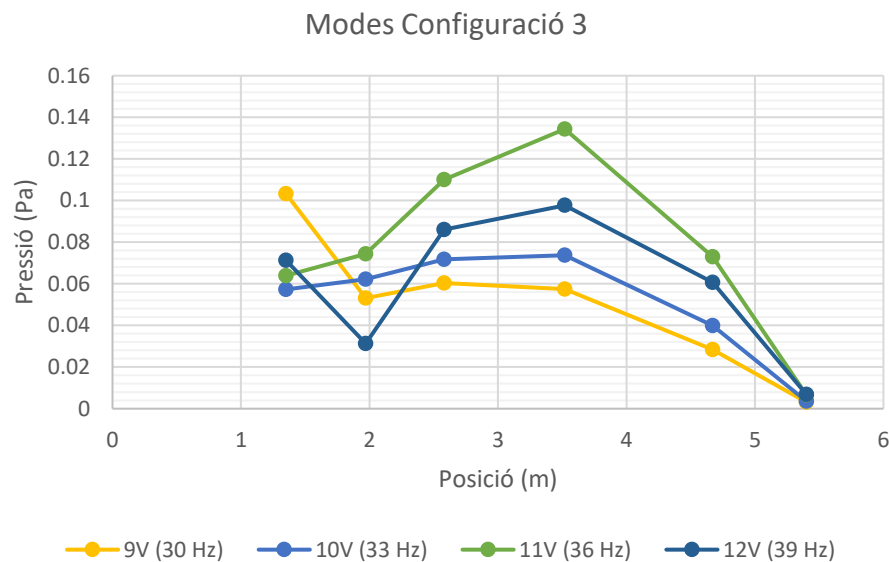


Fig. 4.29: Modes a les freqüències destacades a la configuració 3.

Els modes mostrats a la Fig. 4.29 donen informació addicional sobre el comportament del fluid i permeten descartar freqüències que anteriorment s'havien considerat com possibles candidates a ser natural del sistema en la configuració 3.

Igual que passava a la configuració 2, a la configuració 3 no hi ha cap mode que tingui pressions que destaquin sobre les altres. A la freqüència on les pressions són màximes, de 36 Hz, la pressió màxima es troba al punt 4, situat a 3'52 metres de l'origen. La forma del mode en aquesta freqüència és similar a la d'un mode fonamental, però la seva pressió

màxima, que és de 0'134 Pa, és només un 37% superior que el pic a la freqüència de 39 Hz, de 0'097 Pa, i un 30% superior que el pic a 30 Hz, de 0'103 Pa. Aquests increments són significativament menors que els observats en les configuracions 0 i 1, cosa que pot significar que la freqüència natural fonamental d'aquesta configuració es trobi fora del rang de freqüències excitable amb el ventilador.

La resta de modes es troben a la Fig. 4.30, i la seva forma indica que les freqüències a les que corresponen no són naturals del sistema.

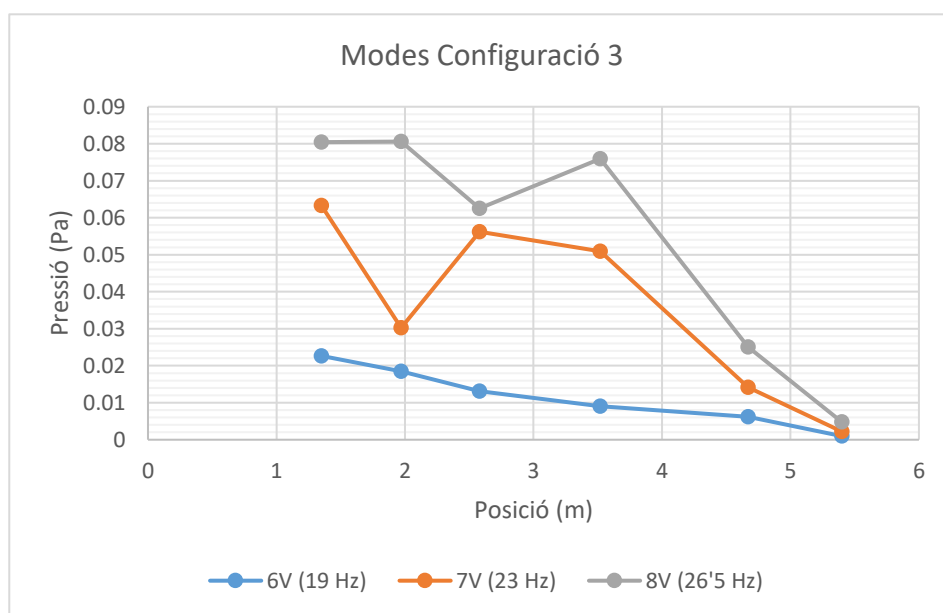


Fig. 4.30: Modes restants a la configuració 3.

4.7.5. Variació de la freqüència natural fonamental

Havent vist els resultats obtinguts a les diferents configuracions, a continuació es valoraran en conjunt per tal de determinar la variació de la freqüència natural a mesura que es tanca la vàlvula.

La freqüència natural fonamental porta associada un increment de la pressió i un mode determinat, amb l'amplitud màxima de pressió al centre del conducte. A continuació es mostra la freqüència a la que s'ha registrat l'amplada màxima de l'ona de pressió per cada configuració i quin valor té aquesta amplada.

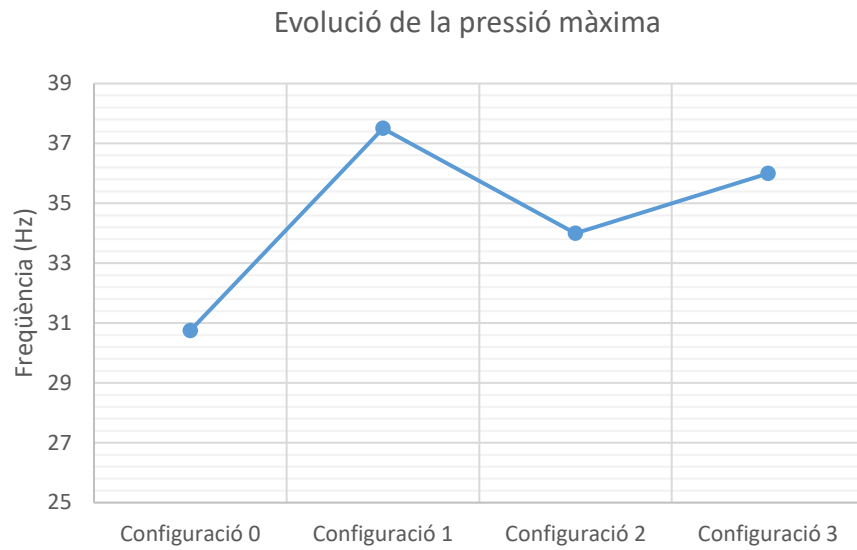


Fig. 4.31: Evolució de les freqüències amb la màxima pressió registrada.

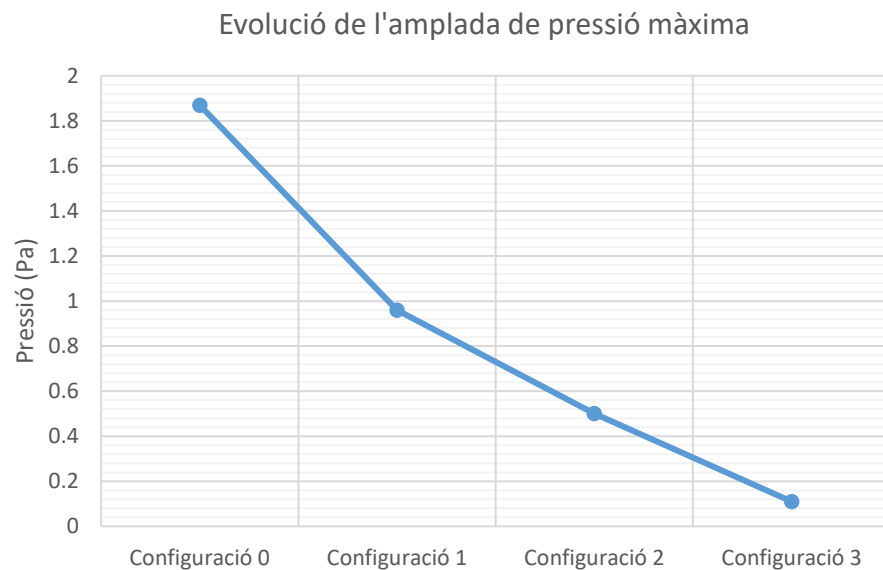


Fig. 4.32: Evolució de la pressió màxima registrada.

La Fig. 4.31 mostra que les freqüències en què s'ha mesurat la màxima pressió en el conducte varien en funció del grau de tancament de la vàlvula. La variació, però, no té una tendència clara en les diferents configuracions, ja que aparentment la freqüència natural augmenta quan es comença a tancar la vàlvula fins a un terç del total però a partir d'aquest punt baixa fins a arribar a la meitat del tancament i torna a augmentar si es continua tancant la vàlvula. Per

veure a què és degut aquest comportament s'observarà amb més detall què passa a cada configuració.

En el cas de la configuració 0 la freqüència on s'ha registrat la màxima pressió és 30'5 Hz, corresponent a una tensió de 9 volts. El valor de la pressió al centre del conducte a aquesta freqüència és de 1'869 Pa. Tot i ser la freqüència on hi ha la pressió màxima, la pressió màxima registrada a 34 Hz (10 volts d'alimentació) té un valor molt pròxim, de 1'766 Pa. Aquestes pressions destaquen per sobre de la resta que apareixen en la configuració, que registren valors del 52% del màxim absolut o menors. Els modes obtinguts (figura()) a les dues freqüències mencionades, a més, tenen la forma característica d'un mode fonamental, amb l'amplitud de la pressió propera a zero a l'inici del conducte, un pendent positiu a la primera meitat fins a arribar al màxim punt central i pendent negatiu a la segona meitat fins al final, on hi ha pressió zero. Addicionalment, la freqüència natural fonamental calculada analíticament per aquesta configuració a l'apartat 3.1.3 és de 31'53 Hz, que es troba dins l'interval marcat per les freqüències excitades de 30'5 Hz i 34 Hz. És per aquests motius, i tenint en compte que l'experiment realitzat no permet trobar el valor amb més exactitud, que es pot afirmar que la freqüència natural fonamental del sistema es troba acotada dins d'aquest interval.

La configuració 1, amb $\alpha = 0'33$, té un comportament similar a la configuració 0. Hi ha un pic marcat en les pressions màximes a les freqüències de 37'5 Hz i 40'5 Hz, amb pressions similars, de 0'960 Pa i 0'901 Pa respectivament. A la resta de freqüències les pressions màximes registrades són significativament menors que la màxima absoluta de 0'960 Pa: la pressió a la freqüència excitada més propera, 34 Hz, és d'un 64% del valor màxim, i el percentatge es redueix a mesura que s'exciten freqüències més baixes. A les freqüències esmentades els modes que es formen són els esperats a una freqüència natural fonamental, ja que la pressió màxima es produeix al punt 3, al centre del tub. En aquesta configuració no es disposa d'un càlcul analític de la freqüència natural que serveixi d'orientació, però els resultats experimentals mostren que a les freqüències de 37'5 Hz i 40'5 Hz es compleixen les condicions que caracteritzen una freqüència natural, de manera que aparentment la freqüència natural fonamental d'aquesta configuració es troba en aquest interval. A l'interval de freqüències on s'ha trobat la freqüència natural a la configuració 0 les pressions mesurades són significativament menors en comparació a les màximes obtingudes, cosa que indica que la freqüència natural s'ha desplaçat.

Pel que fa a la configuració 2 ($\alpha = 0'5$), la figura() mostra que la pressió màxima s'ha registrat a una freqüència de 34 Hz. Si aquesta freqüència és natural en aquesta configuració significaria que la tendència de la variació de les freqüències naturals no és augmentar a mesura que s'augmenta el grau de tancament de la vàlvula, sinó que hi ha zones amb pendent positiu i altres amb pendent negatiu. Per tant, la pregunta que sorgeix és si la freqüència de 34 Hz és natural del sistema en aquesta configuració. Les dades recollides a l'experiment, que es mostren a l'apartat 4.6.3, mostren que la freqüència a la que s'ha produït el màxim

absolut de pressió no destaca significativament sobre les altres, ja que hi ha quatre freqüències de les excitades que tenen màxims per sobre del 78% de la pressió màxima absoluta. Són les freqüències que es troben a l'interval entre 31 Hz i 40'5 Hz. Els modes obtinguts en aquest interval (figura()) mostren diferents comportaments a les freqüències de l'interval: a 31 Hz és pràcticament pla a la primera meitat del tub, i la pressió màxima no es produeix al centre, de manera que el mode no té l'aparença d'un mode fonamental, mentre que als modes a 34 Hz i 40'5 Hz es veu una forma més propera al que s'esperaria en una freqüència fonamental. Tot i que en aquestes últimes freqüències la forma del mode sigui la que es busca, el fet que les pressions màximes que apareixen no sigui tan destacat com a les configuracions 0 i 1 indica que és possible que la freqüència natural del sistema en la configuració 2 no hagi sigut excitada degut a que es troba fora del rang de funcionament del ventilador que s'ha utilitzat.

Finalment, els resultats obtinguts a la configuració 3, amb $\alpha = 0'67$, són similars als de la configuració 2, i per tant la conclusió que se'n pot treure és la mateixa. En aquest cas la pressió màxima absoluta s'ha donat a 36 Hz. Hi ha diferents freqüències on s'obtenen pressions màximes similars a aquesta, però el que més crida l'atenció és que en cap de les freqüències excitades s'ha produït la pressió màxima al punt central del tub. Com a conseqüència d'aquest fet cap dels modes obtinguts, que es poden veure a la figura(), té la forma buscada. Tenint això en compte es pot concloure que en aquesta configuració la freqüència natural fonamental no ha sigut excitada, igual que passa a la configuració 2.

En conjunt s'observa que la pressió registrada disminueix quan s'augmenta el grau de tancament de la vàlvula. Les pressions màximes, que sempre es produeixen als punts posteriors a la vàlvula, cauen de forma consistent a mesura que el cabal que la vàlvula deixa circular a través del tub disminueix, cosa que és un comportament normal en sistemes de canonades.

Pel que fa a la pregunta sobre si la freqüència natural fonamental varia quan es canvia el grau de tancament de la vàlvula, els resultats indiquen que sí que es detecta una variació. A la configuració 0 s'ha arribat a la conclusió que la freqüència natural es troba entre 30'5 Hz i 34 Hz, probablement propera als 31'5 Hz calculats analíticament a l'apartat 3.1.3. El comportament que mostra aquest rang de freqüències quan la vàlvula està totalment oberta, però, no es repeteix a la resta de configuracions estudiades.

Tot i que els resultats de l'experimentació semblen confirmar la hipòtesi inicial cal dir que no són suficients per determinar amb més exactitud com és la variació de la freqüència natural i com es relaciona amb el grau de tancament. És per aquest motiu que els resultats obtinguts no es poden considerar definitius, i seria recomanable continuar amb l'experimentació en el futur. Aquesta experimentació hauria tenir com a objectiu la complementació dels resultats obtinguts en el projecte, posant èmfasi en millorar dos aspectes que en aquest projecte no

s'han pogut treballar suficient; d'una banda augmentar el rang de les freqüències excitades, que en l'experimentació feta s'ha vist que és massa petit. Actualment només permet excitar freqüències entre 19 Hz i 41 Hz, i tenint en compte que la freqüència natural més baixa que té el sistema és de 31 Hz a la configuració 0, i que segons mostren els resultats aquesta freqüència tendeix a pujar en tancar la vàlvula, seria interessant augmentar el rang. D'aquesta manera es podria comprovar si la hipòtesi que ha sorgit de l'experimentació, segons la qual les freqüències naturals de les configuracions 2 i 3 són fora del rang excitat, és certa o no. El segon aspecte a millorar és la precisió en les freqüències excitades. El mètode utilitzat en aquest projecte consisteix en excitar freqüències a partir d'un ventilador alimentat amb una font de tensió, i les mostres que s'han agafat han estat amb una precisió d'uns 3 Hz. Tot i que al ser un procés experimental ja es comptava des de l'inici que la precisió no seria alta, els resultats obtinguts no són prou precisos per determinar amb exactitud suficient les freqüències naturals del sistema, i el màxim que s'ha pogut fer ha estat acotar els resultats dins d'interval·ls d'uns 3 Hz. Per obtenir resultats més fiables caldria instal·lar al sistema un mètode per controlar la velocitat de rotació de l'eix del ventilador amb més precisió, ja que és aquesta velocitat la que determina la freqüència excitada en el fluid. Per últim, seria necessari generar pressions i cabals més grans a l'interior del conducte. Amb el sistema actual les pressions generades són molt baixes, especialment en les configuracions en les que la vàlvula està més tancada, i seria positiu poder augmentar-les per tal de poder fer mesures amb els baròmetres de columna d'aigua que hi ha al laboratori. D'aquesta manera seria possible determinar els modes mesurant la pressió simultàniament a tots els punts del conducte, cosa que no s'ha pogut fer en aquest projecte.

Adicionalment, també seria positiu comparar els resultats obtinguts experimentalment amb una simulació numèrica del sistema per estudiar-ne les similituds i les diferències, que proporcionarien més informació amb la que treure conclusions.

5. Proposta per incloure els conceptes treballats en una pràctica de laboratori

A partir dels resultats exposats es farà una proposta de com es podria plantejar una pràctica de laboratori per l'assignatura de Sistemes de Distribució de Canonades. A continuació es tractaran els aspectes que es podrien incloure a la pràctica, així com els canvis que s'haurien de fer al sistema per adequar-lo a l'equipament disponible al laboratori del departament de Mecànica de Fluids actualment.

5.1. Objectius de la pràctica

L'objectiu principal de la pràctica consisteix en determinar la freqüència natural fonamental del sistema, que aprofitant que ja es troba al laboratori seria el mateix amb el que s'ha dut a terme l'experimentació en aquest projecte: un tub cilíndric de 5'4 metres de longitud. La resta de característiques del tub són irrellevants, ja que no afecten a les freqüències naturals. El fet que el sistema amb el que es treballa sigui simple, format només per un tub recte, permet calcular-ne fàcilment les freqüències naturals amb mètodes analítics, tal com s'ha fet a l'apartat 3.1 en aquest projecte. D'aquesta manera es poden tenir valors de referència amb els que treballar en el sistema real.

El segon objectiu consisteix en trobar la forma del mode corresponent a la freqüència natural. Per exemple, en el cas de la freqüència natural fonamental, que per l'experimentació feta sabem que es troba a 31 Hz, el mode té dos punts nodals (amb pressió d'amplitud nul·la) als extrems i un punt nodal (amb pressió d'amplitud màxima al centre. Seria interessant trobar també la freqüència del primer harmònic que s'hauria de trobar al voltant dels 63 Hz, i comparar els dos modes per veure com varien les distribucions de pressió al llarg del tub en diferents harmònics. En el cas del primer harmònic el mode hauria de tenir teòricament tres punts nodals, dos a l'extrem i un al centre, i dos punts antinodals situats a un quart i a tres quarts de la longitud del conducte, tot i que en aquest projecte no s'ha comprovat que en el sistema en què s'ha treballat sigui així.

5.2. Canvis necessaris al sistema

Per tal de dur a terme la pràctica és necessari fer canvis al sistema actual per adaptar-lo als instruments de mesura disponibles al laboratori. A continuació es tractaran els aspectes que s'haurien de modificar i es proposaran possibles solucions.

D'una banda cal tenir en compte que a la pràctica no es treballarien els aspectes relacionats amb l'anàlisi freqüencial fet a partir de les transformades de Fourier aplicades a les dades recollides en el domini temporal, ja que per fer-ho seria necessari utilitzar instruments i programari amb els que els alumnes probablement no han treballat mai, i per tant requeriria un temps d'aprenentatge que no deixaria prou estona per realitzar els objectius de la pràctica. És per això que la millor opció seria utilitzar els baròmetres de columna d'aigua i les sondes de Pitot que ja hi ha al laboratori, que els alumnes ja han après a fer servir en altres assignatures.

Per tal d'utilitzar aquests baròmetres és necessari resoldre dos problemes: d'una banda, el ventilador amb el que s'ha treballat mou un cabal molt petit d'aire, i com a conseqüència les pressions generades a l'interior del conducte també ho són, de l'ordre d'un o dos pascals. Els baròmetres no tenen la sensibilitat necessària per detectar pressions d'aquest ordre, i per tant seria impossible mesurar-les amb el ventilador que hi ha instal·lat en aquests moments. D'altra banda, utilitzar baròmetres analògics fa que no sigui possible saber la freqüència excitada en el fluid a partir de les mostres preses, ja que no se'ls pot aplicar una transformada de Fourier per veure-les al domini freqüencial. Això significa que cal trobar una manera de calcular la freqüència excitada a partir d'un altre paràmetre del sistema que es pugui mesurar.

La solució pel problema de la pressió generada és canviar el ventilador actual per un altre de més gran que pugui desplaçar més cabal d'aire, ja sigui un ventilador de contínua alimentat amb una font de tensió o un ventilador de corrent alterna amb un variador de freqüència instal·lat que permeti controlar la velocitat de rotació de l'eix. A més, hauria de tenir un rang de freqüències més gran que el del ventilador actual per tal de poder excitar la freqüència corresponent almenys al segon harmònic. La manera de determinar la freqüència excitada en el fluid depèn del ventilador que s'utilitzi; Si és un ventilador alimentat amb una font de tensió contínua probablement la velocitat de rotació, que determina la freqüència excitada, sigui proporcional a la tensió d'alimentació, com és el cas del ventilador utilitzat en el projecte (veure figura()). En cas que s'utilitzi un variador de freqüència s'hauria de trobar la relació entre la freqüència fixada i la freqüència de rotació del ventilador. En qualsevol cas serà necessari que aquesta relació es proporcioni als alumnes per resoldre la pràctica.

Per últim, per tal de trobar els modes seria positiu obrir més forats al llarg del conducte per poder agafar més mostres. D'aquesta manera es podria determinar la forma del mode amb més precisió, sobretot del 1r harmònic, que té una forma més complexa que el mode fonamental.

Conclusions

Havent finalitzat el projecte és el moment de fer una valoració dels resultats obtinguts i extreure'n les conclusions. El primer que s'ha de dir sobre els resultats és que si bé mostren una tendència de la freqüència natural a variar en funció del grau de tancament de la vàlvula, no seria correcte considerar-los definitius degut a diverses limitacions que no han permès arribar a uns resultats tan precisos com es voldria. Tot i això, mostren comportaments interessants del sistema que valdria la pena continuar estudiant en un futur, després de fer les modificacions necessàries al sistema per obtenir resultats més precisos i fiables.

A l'inici del projecte s'ha plantejat com a hipòtesi que en variar el tancament de la vàlvula la freqüència natural del sistema es desplaça respecte a la posició on es troba quan la vàlvula està completament oberta, i en funció d'aquesta hipòtesi s'ha dissenyat el procés experimental per comprovar-ne la certesa. Els resultats apunten a que aquesta variació es produeix, ja que el rang on s'ha acotat la freqüència natural per a la configuració inicial, amb la vàlvula oberta, no coincideix amb els rangs on s'ha acotat aquesta freqüència per les altres configuracions. Malgrat que la tendència detectada a la freqüència natural és d'augmentar a mesura que es tanca la vàlvula no s'ha pogut determinar amb precisió com és aquesta variació en cada grau de tancament degut a les limitacions imposades pels elements del sistema. Principalment han estat dues: d'una banda el rang de freqüències excitades pel ventilador, que al llarg de l'experimentació s'ha vist que és massa baix i no ha permès veure amb claredat si la tendència observada entre les configuracions 0 i 1 es segueix produint a les altres dues configuracions, deixant el dubte de si les freqüències naturals de les configuracions 2 i 3 han estat excitades o es troben fora del rang de funcionament del ventilador. Per altra banda l'obtenció de resultats fiables s'ha vist afectada per la precisió de les freqüències excitades. El funcionament de la font d'alimentació i el ventilador ha permès excitar freqüències amb una precisió de 3 Hz, que ha permès acotar les freqüències naturals en rangs prou petits per fer una valoració qualitativa de la variació d'aquestes però que és massa petit per obtenir resultats més exactes.

Els dos problemes observats es concentren en la instrumentació utilitzada per excitar freqüències, de manera que en futures experimentacions n'hi haurà prou amb canviar el ventilador actual per un amb un rang de funcionament més adequat, per exemple un ventilador amb motor d'alterna controlat amb un variador de freqüència, que permetria més precisió en el control de la velocitat de rotació.

Per últim, s'ha arribat a la conclusió que el sistema es podria utilitzar per implementar una pràctica de laboratori sobre fluxos compressibles on es treballi el fenomen de la ressonància, després de modificar-lo per adequar-lo als objectius que es plantegin.

Agraïments

En primer lloc m'agradaria donar les gràcies al director del projecte, David Valentín, per haver proposat el tema i per la dedicació i l'ajuda que m'ha ofert sempre que ho he necessitat al llarg d'aquests mesos.

També m'agradaria agrair al Departament de Mecànica de Fluids haver-me permès utilitzar el seu laboratori i els seus instruments per dur a terme l'experimentació feta en el projecte.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] BLEVINS, ROBERT D. *Formulas for natural frequency and mode shape*, New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1979.
- [2] SERWAY – JEWETT. *Physics for scientists and engineers*, Boston: Brooks/Cole, 2014. p. 508 - 510

Bibliografia complementària

Referències bibliogràfiques i pàgines web de temàtica relacionada amb el projecte però que no s'han mencionat al llarg de la memòria.

Sobre flux compressible i ressonància acústica:

- [3] VIRTO ALBERT, LUÍS. *Dinámica de gases*, Barcelona: Iniciativa Digital Politècnica, Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC, 2017. p. 139 – 212.
- [4] [<https://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/sound-wave-equation.htm>]

Sobre la transformada de Fourier:

- [5] [<https://mat-web.upc.edu/etseib/calcul2/docs/fourier.pdf>]
- [6] [<https://mathworld.wolfram.com/FourierSeries.html>]
- [7] [<https://mathworld.wolfram.com/FourierTransform.html>]

Sobre la instrumentació utilitzada:

- [8] [<http://www.testequipmenthq.com/>]
- [9] [<https://www.bksv.com/>]

Annex

Fulls de característiques de la instrumentació

Font de tensió

Reliable Power, Repeatable Results

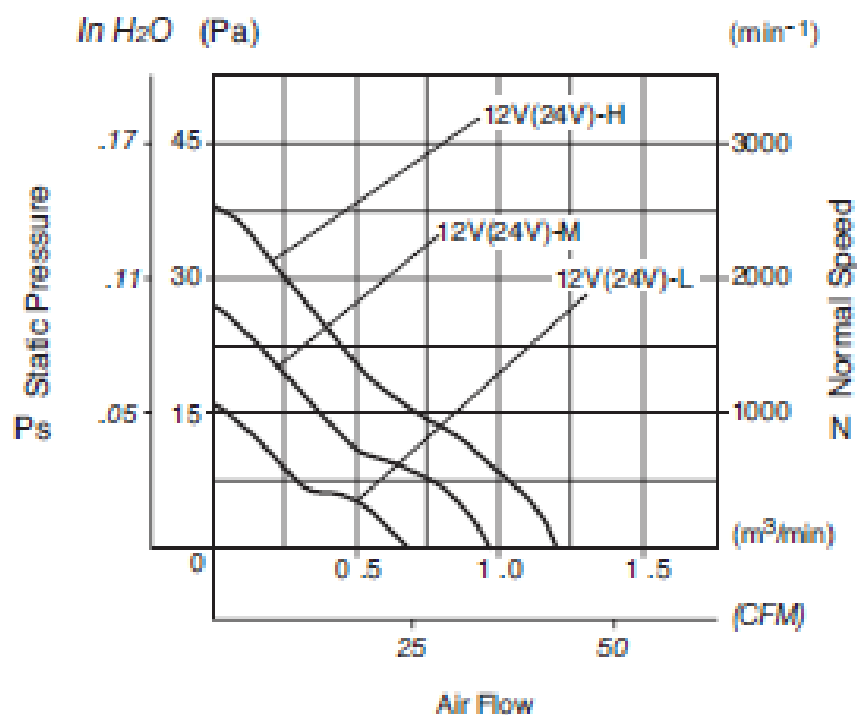
- Linear power supply
- Single, dual or triple output
- 10-turn voltage and current control
- Low noise and excellent regulation



	E3610A	E3611A	E3612A	E3614A	E3615A	E3616A	E3617A	E3620A	E3630A
Features	Dual range, Voltage (CV) modes.	10 turn pots, Constant Voltage (CV), Constant Current (CC) modes.	Constant Voltage (CV), Constant Current (CC) modes.	Adjustable overvoltage protection, voltage & resistance programming, remote sense, rear outputs, ten turn pots, CV, CC modes. Multiple supplies can be connected for tracking or higher power.				Isolated dual outputs, 10 turn pots CV, CL	Tracking, CV, CL (± 20 V) CV, CF (+6 V)
Number of outputs				1				2	3
Number of Output Ranges	2	2	2	1	1	1	1	1	1
DC Output Rating	8 V, 3 A 15 V, 2 A	20 V, 1.5 A 35 V, 0.85 A	60 V, 0.5 A 120 V, 0.25 A	8 V, 6 A	20 V, 3 A	35 V, 1.7 A	60 V, 1 A	25 V, 1 A 25 V, 1 A	+6 V, 2.5 A +20 V, 0.5 A -20 V, 0.5 A
Load and Line Regulation			< 0.01% + 2 mV						
Ripple and Noise (20 Hz to 20 MHz)									
Normal mode voltage	< 200 μ Vrms, < 2 mVpp			< 200 μ Vrms, < 1 mVpp				< 350 μ Vrms, < 1.5 mVpp	
Normal mode current	< 200 μ Arms, < 1 mVpp			< 0.02% + 3 mA	< 0.02% + 1.5 mA	< 0.02% + 1 mA	< 0.02% + 0.5 mA	-	
Common mode current				Not specified				< 1 μ Arms	
Transient Response Time	< 50 μ sec following a change in output current from full load to half load for output to recover within:								
	10 mV			15 mV					
Meter Accuracy	$\pm 0.5\%$ + 2 counts at 25 $^{\circ}$ C ± 5 $^{\circ}$ C								
Meter Resolution									
Voltage	10 mV	100 mV	100 mV	10 mV	10 mV (0–20 V), 100 mV (>20 V)				10 mV
Current	10 mA	10 mA	1 mA	10 mA	10 mA	1 mA	1 mA	1 mA	10 mA
Isolation	240 Vdc								

Ventilador

Characteristic Curves



MODEL	Rated Voltage	Operating Voltage	Current	Input Power	Rated Speed	Max. Flow		Max. Static Pressure		Noise	Mass
	(V)	(V)	(A) ^{*1}	(W) ^{*1}	(min^{-1}) ^{*1}	CFM ^{*1}	(m^3/min) ^{*1}	in H ₂ O	(Pa) ^{*1}	(dB) ^{*1}	(g)
FBA08A 12L	12	7.0 ~ 13.8	68	0.82	1900	24.0	0.68	.06	15.4	21.0	100
FBA08A 12M	12	7.0 ~ 13.8	124	1.49	2450	32.1	0.91	.09	24.6	28.0	100
FBA08A 12H	12	7.0 ~ 13.8	173	2.08	2950	39.6	1.12	.14	37.1	32.0	100
FBA08A 24L	24	14.0 ~ 27.6	54	1.30	1900	24.0	0.68	.06	15.4	21.0	100
FBA08A 24M	24	14.0 ~ 27.6	71	1.70	2450	32.1	0.91	.09	24.6	28.0	100
FBA08A 24H	24	14.0 ~ 27.6	105	2.52	2950	39.6	1.12	.14	37.1	32.0	100

Rotation: Clockwise

Airflow Outlet: Air Out Over Struts

*1: Average Values in Free Air

Micròfon

10 kHz Array Microphone — Type 4957

Uses

- Measurements using STSF, NAH and Beamforming
- Array measurements
- Simultaneous recording of time signals in medium to large microphone arrays, for example, simulated pass-by measurements
- Cost-effective in-car measurements

Features

- Sensitivity: 11.2 mV/Pa (−39 dB re 1 V/Pa)
- Frequency range: 50 – 10000 Hz
- Dynamic Range: 32 – 134 dB
- Built-in DeltaTron® preamplifier with TEDS – IEEE 1451.4 V.1.0
- Specified phase-matching
- Clips directly into existing Brüel & Kjær array systems



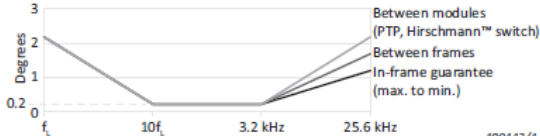
070221

- Detachable cable with SMB coaxial plug
- Dimensions: 34 mm long, 7 mm diameter
- Temperature: −10 to +55°C (+14 to +131°F)

Specifications	Value
Guaranteed Specifications*	
Sensitivity	−39 dB re 1 V/Pa ±3 dB, 11.2 mV/Pa (@ 250 Hz)
Free-field Frequency Response (re 250 Hz)	±2 dB, 100 Hz to 5 kHz ±3 dB, 50 Hz to 10 kHz
Inherent Noise	<32 dB SPL (A-weighted)
Upper Limit of Dynamic Range	134 dB (THD <3%)
Phase-matching relative to a factory reference	<±5°: 100 Hz to 3 kHz <±10°: 3 kHz to 10 kHz
General Specifications†	
Inherent Noise (A-weighted)	32 dB (−10 to +40°C, +14 to 104°F) 37 dB (−10 to +55°C, +14 to 131°F)
Output Impedance	<150 Ω
Output Voltage: Voltage Swing DC Bias	>5 V _{pp} 12 V ± 4 V
Max. Load: 5 kHz, 134 dB	30 nF corresponding to 300 m cable
Output Socket	SMB coaxial plug
Polarization Voltage	Prepolarized
TEDS	IEEE 1451.4 V.1.0 Template I27-0-0-0U
Environmental	
Operating Temperature Range	−10 to +55°C (+14 to 131°F)
Storage Temperature	−25 to +70°C (−13 to +158°F)
Operating Humidity Range	0% – 90% RH without condensation
Vibration Sensitivity (20 to 1000 Hz)	Approx. 50 dB equivalent SPL for 1 m/s ² axial acceleration
Magnetic Field Sensitivity	40 dB SPL for 80 A/m, 50 Hz field
Physical	
Diameter	7 mm (~1/4")
Length	34 mm (1.33")
Weight	3.8 g (0.11 oz.)

Mòdul d'adquisició de dades

INPUT CHANNELS – TYPE 3053

Input Impedance		Direct: 1 M Ω <300 pF CCLD: >100 k Ω <300 pF			
Absolute Maximum Input		± 60 V _{peak} without damage			
High-pass Filters		– 0.1 dB*	–10% @ **	–3 dB @ **	Slope
* defined as the lower frequency, f_L , for guaranteed fulfilment of –0.1 dB accuracy	0.1 Hz –10% digital high-pass filter	0.5 Hz	0.1 Hz	0.05 Hz	–20 dB/dec.
	0.7 Hz –0.1 dB digital high-pass filter	0.7 Hz	0.15 Hz	0.073 Hz	
	1 Hz analogue –10% high-pass filter	5 Hz	1.0 Hz	0.5 Hz	–20 dB/dec.
** defined as the nominal –10%/–3 dB filter frequency	7 Hz –0.1 dB digital high-pass filter	7 Hz	1.45 Hz	0.707 Hz	–20 dB/dec.
	22.4 Hz –0.1 dB analogue*** high-pass filter	22.4 Hz	14.64 Hz	11.5 Hz	–60 dB/dec.
*** single analogue pole + 2nd order digital filter section		Intensity filter (analogue)	112 Hz	23.00 Hz	11.2 Hz
Absolute Amplitude Precision, 1 kHz, 1 V input		± 0.05 dB, typical ± 0.01 dB			
Amplitude Linearity		± 0.1 dB, typ. ± 0.01 dB			
(linearity in one range)		± 0.2 dB, typ. ± 0.02 dB			
		typ. ± 0.05 dB			
Overall Frequency Response re 1 kHz, from lower limit f_L to upper limit f_U f_L is defined as the lower frequency for guaranteed fulfilment of –0.1 dB accuracy (see under High-pass Filters) f_U is defined as the chosen frequency span		± 0.1 dB			
Noise	Input Range	Guaranteed		Typical	
Measured lin. 10 Hz to 25.6 kHz (input terminated by 50 Ω or less)	1 V _{peak}	<7.5 μ V _{rms} (<47 nV _{rms} / $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz)		<5.5 μ V _{rms} (<35 nV _{rms} / $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz)	
	10 V _{peak}	<75 μ V _{rms} (<470 nV _{rms} / $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz)		<55 μ V _{rms} (<350 nV _{rms} / $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz)	
Spurious-free Dynamic Range re full scale input (input terminated by 50 Ω or less)	Input Range	Typical			
	1 V _{peak}	130 dB			
Spurious-free Dynamic Range is defined as: The ratio of the rms full scale amplitude to the rms value of the peak non-harmonic spectral component	10 V _{peak}	130 dB 120 dB with DC coupling			
DC Offset re Full Scale		Guaranteed		Typical	
Measured after automatic DC compensation at current temperature when changing from AC to DC coupling or changing input range when DC coupled		<–80 dB		<–90 dB	
Harmonic Distortion (all harmonics)		Guaranteed		Typical	
		–80 dB in 1 V range –75 dB in 10 V range		–100 dB @ 1 kHz	
Crosstalk		Frequency Range	Guaranteed	Typical	
Between any two channels of a module or between any two channels in different modules		0 – 25.6 kHz	–80 dB	–100 dB	
Channel-to-channel Match (10 V _{peak} and 1 V _{peak} input ranges)		Guaranteed			Typical
Maximum Gain Difference f_L is defined as the –0.1 dB filter frequency		0.1 dB, from lower frequency limit, f_L , to 25.6 kHz (0.4 dB at –10% filter frequency)			± 0.01 dB
Maximum Phase Difference f_L is defined as the –0.1 dB filter frequency					

180113/1

POWER REQUIREMENTS

DC Input: 10–32 V DC

Connector: LEMO coax., FFA.00.113, ground on shield

Power Consumption:

DC Input: <15 W

Typical Operating Time on Battery Type 2831-A:

- >7 hours with single module
- >40 minutes in Type 3660-D-100 frame (up to two batteries in Type 3660-D-100)

Supply via PoE: According to IEEE 802.3af,

Max. cable length is 100 m (328 ft)

Temperature Protection: Temperature sensor limits module's internal temperature to 80 °C (176 °F). If temperature exceeds limit, system will automatically enable fan in LAN-XI frame or shut down module outside frame

LAN

Connector type RJ 45

DIMENSIONS AND WEIGHT

Height: 132.6 mm (5.22")

Width: 27.5 mm (1.08")

Depth: 248 mm (9.76")

Weight: 750 g (1.65 lb)